

SÉRIE A, N° 396

N° D'ORDRE

420

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PAR

René J. L. MOINEAU

LICENCIÉ ÈS SCIENCES

1. THÈSE. — L'Aile battante

2. THÈSE. — Un nouveau capsulisme

Soutenues le

Juin 1939 devant la Commission d'examen

15 JUIN 1939

MM. Villat

Président

Béghin

Toussaint

} *Examineurs*

SÉRIE A, N° 396

N° D'ORDRE

420

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PAR

René J. L. MOINEAU

LICENCE ÈS SCIENCES

1^{re} THÈSE. — L'Aile battante

2^e THÈSE. — Un nouveau capsulisme

Soutenues le

Juin 1939 devant la Commission d'examen

MM. Villat

Président

Béghin

Toussaint

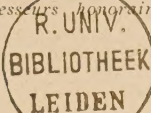
} *Examineurs*

Faculté des Sciences de l'Université de Paris

Doyen honoraire
Doyen

M. MOLLIARD
C. MAURAIN, Professeur, Physique du Globe

Professeurs honoraires



H. Lebesgue.
Émile Picard
Léon Brillouin
Guillet
Préclard
Freundler
Auger

Dangeard.
Lespieau.
Marchis.
Vessiot.
Portier.
Molliard.
Lapicque.

G. Bertrand.
Abraham.
Ch. Fabri
Léon Bertrant.
Wintrebert.
Duboscq.
Bohn.
Raband.

PROFESSEURS

M. Caullery.	T Zoologie (Évolution des êtres organisés)	Foch.	Mécanique expérimentale des fluides.
Émile Borel.	T Calcul des probabilités et Physique mathématique	Pauthenier.	Physique (P.C.B.)
Jean Perrin.	T Chimie physique.	De Broglie.	T Théories physiques.
E. Cartan.	T Géométrie supérieure.	Chrétien.	Optique appliquée.
À Cotton.	T Recherches physiques.	P. Job.	Chimie générale.
J. Drach.	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	Labrousse.	Physique du globe.
Charles Pérez.	T Zoologie.	Prenant.	T Anatomie et histologie comparées.
M. Cuichard.	T Analyse et mesures chimiques.	Villey	Mécanique physique et expérimentale.
Paul Montel.	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	Combes.	T Physiologie végétale.
L. Blaringhem.	T Botanique.	Garnier.	T Mathématiques générales.
G. Julia.	T Mécanique analytique et mécanique céleste.	Péres.	Mécanique théorique des fluides.
C. Mauguin.	T Minéralogie.	Hackspill.	T Chimie minérale.
A. Michel-Lévy.	T Pétrographie.	Laugier.	T Physiologie générale.
N.	Mécanique expérimentale des fluides.	Toussaint.	Technique Aéronautique.
A. Denjoy.	T Application de l'analyse à la Géométrie.	M. Curie.	Physique (P.C.B.).
I. Lutaud.	T Géométrie physique et géologie dynamique.	G. Ribaud.	T Hautes températures.
Eugene Bloch.	T Physique.	Chazzy.	T Mécanique rationnelle,
G. Bruhat.	T Physique théorique et physique céleste.	Gault.	Chimie (P.C.B.)
E. Darmon.	T Enseignement de physique	Croze.	Recherches physiques.
A. Debièvre.	T Physique Générale et Radioactivité.	Dupont.	T Théories chimiques.
A. Dufour.	T Physique (P.C.B.)	Lanquine.	T Géologie structurale et Géologie appliquée.
I. Dunoyer.	Optique appliquée.	Valiron.	Mathématiques générales
A. Guillaumond.	T Botanique	Barrabé.	Géologie structurale et géologie appliquée.
M. Javillier.	T Chimie biologique.	Millot	Biologie animale (P.C.B.).
Robert-Lévy.	T Physiologie comparée.	F. Perrin.	Théories physiques.
F. Picard.	Zoologie (Évolution des êtres organisés).	Vayon.	Chimie organique.
Henri Villat.	T Mécanique des fluides et applications.	G. Darmon	Calcul des probabilités et Physique-Mathématique
Ch. Jacob.	T Géologie.	Chatton.	T Biologie maritime.
P. Pascal.	T Chimie générale.	Anbel.	Chimie biologique.
M. Fréchet.	T Calcul différentiel et Calcul intégral.	Jacques Boucart.	Géographie physiques et Géologie dynamique.
E. Esclançon.	T Astronomie	M. Joliot-Curie.	Physique générale et Radioactivité.
M. Ramart-Lucas.	T Chimie organique.	Plantefol.	Biologie végétale (P.C.B.)
H. Béghin.	T Mécanique physique et expérimentale.	Cabannes.	Enseignement de physique
		Grassé.	Biologie animale (P.C.B.)
		Prévost.	Chimie (P.C.B.)
		Bouligand.	Mathématiques.
		Chaudron.	Chimie (P.C.B.)

Secrétaire

A. PACAUD

Secrétaire honoraire

D. TOMBECK

A Monsieur le Professeur TOUSSAINT

Hommage respectueux et reconnaissant.

L' AILE BATTANTE

Je me suis depuis longtemps demandé si l'aile battante était un bon *propulseur* et si elle constituait en même temps un bon *sustentateur*.

Il m'a paru intéressant d'essayer des battements rapides et de faible amplitude suivant des lois simples.

Je me propose de présenter ci-dessous ma thèse sur ce sujet.

Après un exposé des travaux antérieurs qui, si étonnant que cela soit, sont rares, j'ai voulu que cette thèse reposât d'abord sur l'expérience, et je n'annonce des conclusions qu'après plusieurs mois d'essais.

Je décris mes expériences dans l'ordre chronologique.

Je m'excuse de présenter des résultats si modestes et si incomplets, en regard de ce qu'il reste à faire, mais je crois être parvenu à des vues nouvelles sur ce sujet vieux comme l'oiseau ou le poisson.

On me pardonnera de désirer les faire connaître en formulant le vœu que des chercheurs et des savants s'y intéressent.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

TABLE DES MATIERES

AVANT - PROPOS	
TABLES	
ETUDE HISTORIQUE DE L'AILE BATTANTE	5
ESSAIS PRELIMINAIRES	15
Essais sur la balance de Lelarge	15
Visualisation des tourbillons propulsifs de l'aile battante	17
Battements propulsifs dans l'eau	17
Battements au manège hydrodynamique	19
<i>Programme d'essais</i>	21
<i>Préparation de la soufflerie hydrodynamique</i>	22
AUTOPROPULSION DE L'AILE BATTANTE	25
<i>Autorotation d'une hélice battante</i>	28
<i>Autopropulsion en translation</i>	29
<i>Autopropulsion à diverses vitesses</i>	31
<i>Mesures de puissance</i>	34
<i>Réduction des résonnances</i>	36

HYPERSUSTENTATION DE L'AILE BATTANTE	37
L'hélice battante sustentatrice	38
Mesures de l'hypersustentation	39
<i>Polaires de l'aile battante</i>	40
Polaires diverses (grande aile biconvexe symét.)	41
Polaires d'aile moyenne	43
<i>L'aile battante à profil creux</i>	46
<i>Anomalies dues à la soufflerie hydrodynamique</i>	48
Suite des polaires avec déflexions vers la surface et vers le fond	49
Tentatives diverses et suppression de la veine libre	50
<i>Hypersustentation dans l'air</i>	53
PRECISIONS DIVERSES	55
<i>Nouveaux essais d'hélice battante</i>	56
<i>Vitesse de translation de l'aile battante</i>	58
<i>Puissance consommée par l'aile battante</i>	
au point fixe	60
en translation	64
<i>Hélice battant dans l'air</i>	66
<i>Essai d'un petit planeur vibrant</i>	67
CONCLUSION ACTUELLE	69
RESUME	75
<i>Communication à l'Académie des Sciences du 20 mars 1939</i>	
BIBLIOGRAPHIE	

ETUDE HISTORIQUE DE L'AILE BATTANTE

L'aile battante a naturellement depuis longtemps attiré l'attention, mais j'ai trouvé relativement peu d'écrits sur ce sujet et il m'a suffi de commencer les expériences pour que l'intérêt de ces écrits diminue à mes yeux.

Au début, les chercheurs, en l'absence de laboratoire, regardèrent les oiseaux, puis, plus près de nous, ils les photographièrent et les cinématographièrent.

Plus récemment, quelques-uns songèrent à profiter des expériences connues en soufflant sur une aile fixe pour essayer de calculer ce qui se passerait sur une aile battante en intégrant les réactions instantanées.

C'est le physiologiste Italien Borelli qui me paraît avoir aperçu le premier le phénomène en écrivant dans un traité intitulé : « *De motu animalium* », publié en 1680 :

« Si donc l'air placé sous les ailes est frappé par les parties flexibles de ces dernières avec un mouvement vertical, les voiles et les parties flexibles céderont dans une direction ascendante et formeront un coin ayant la pointe dirigée vers la queue.

« Que l'air donc frappe les ailes par-dessous, ou que les ailes frappent l'air par-dessus, le résultat est le même, les bords postérieurs ou flexibles des ailes cèdent dans une direction ascendante, et en agissant ainsi poussent l'oiseau dans une direction horizontale. »

Il existe deux autres éditions du traité de Borelli, l'une parue en 1685 et l'autre en 1710, avec une annexe de Bernouilli.

Après Borelli, il faut aller jusqu'en 1834 pour voir paraître l'ouvrage de Dubochet :

« Recherches sur le vol des oiseaux et l'art aéronautique. »

Dubochet y décrit le vol des oiseaux et je noterai surtout qu'il critique de vieilles opinions telles que, par exemple, l'allègement du corps de l'oiseau par, notamment, de l'air chaud situé dans les os.

H. Muller est probablement le premier qui ait essayé de visualiser un battement orthogonal d'aile d'oiseau en faisant battre une aile d'oiseau naturalisée devant une colonne de fumée produite par un cordon se consumant lentement. L'expérience de Muller est décrite avec figures dans l'ouvrage de Marrey : « Le Vol des Oiseaux ».

Marrey note que l'air s'échappe suivant le prolongement de la surface de l'aile et que la lame d'air projetée vers l'arrière est d'autant plus épaisse que le mouvement est plus rapide et que cette lame, en pénétrant dans l'air, y provoque des tourbillons.

« On les voit, a dit Muller, (compte rendu t. C, p. 1317), naître, grandir et se propager, en tournant en sens inverse sur les deux faces d'un plan qui prolongerait celui de l'aile. »

Marey en conclut que cette projection d'air vers l'arrière pousse l'air vers l'avant, et il note que l'aile de l'oiseau pendant le battement est projetée vers l'avant sans que l'oiseau ait des muscles pour ramener l'aile vers l'avant, remarque qu'a développé récemment M. Henry Girerd.

Dans le même sens, d'ailleurs, le duc d'Argil relate, dans l'Aéronaute, en juin 1868, qu'en frappant à plat l'air avec une aile d'oiseau naturalisée, cette aile est projetée vers l'avant.

C'est vers la même époque que les premières études photographiques paraissent. Leur principal résultat fut de se perfectionner elles-mêmes jusqu'à parvenir au cinématographe ; il ne semble pas

qu'elles aient appris grand'chose sur les phénomènes qui m'intéressent.

Penaud avait déjà proposé, en 1873, au docteur H. de Villeneuve, d'étudier les oiseaux par la photographie, mais je dois mentionner surtout Mouillard, « L'Empire de l'air » 1881, et Marey, « La machine animale » 1886, et du même, « Le vol des oiseaux » 1890, et, en Angleterre, Pettigrew J. Bell, « La locomotion chez les animaux » 1887. Pettigrew voit le battement tel que le centre de pression décrit une lemniscate avec une incidence changeant constamment.

Ce sont là les maîtres livres sur l'étude photographique du battement qui ne sera reprise, comme je le dirai plus loin, que récemment par M. Oemichen et M. Magnan.

Des inventeurs dans le même temps construisirent de petits modèles tels que l'oiseau artificiel de Lebris en 1857, celui de A. Penaud en 1871, une merveille de mécanique qui volait parfaitement, Victor Tatin en 1876.

Je mentionnerai aussi le Flip Flap de Hargrave, modèle d'avion propulsé par aile battante comme le plus récent modèle de Lippish.

Mentionnerai-je aussi que deux des pionniers de l'avion débütèrent par l'aile battante.

Lilienthal fit un premier appareil à ailes battantes et l'essaya en se pendant à une poulie pendant qu'il faisait battre les ailes avec ses jambes.

Blériot construisit son premier appareil en 1900 ; c'était un avion à ailes battantes dont les ailes comportaient de nombreux petits clapets qui se fermaient dans le battement vers le bas et s'ouvraient dans l'autre sens.

Ce premier modèle avait 1 m. 50 d'envergure, pesait 10 kilos et était actionné par un moteur à acide carbonique de 2 chevaux ; il vola en janvier 1901, et aussitôt après Blériot construisit une machine grandeur réelle munie de 100 chevaux qui explosa aux essais. C'est seulement en 1905 que Blériot revint à l'aviation.

Vers la même époque commencent à paraître des études ma-

thématiques sur les ailes battantes et les auteurs s'efforcent de distinguer l'orthoptère de l'ornithoptère.

D'après ce que j'ai dit déjà, on aurait pu savoir qu'une aile d'oiseau n'est jamais orthoptère, puisque même en battant à plat elle refoule l'air d'avant en arrière suivant son plan ; pourtant on lit dans la Technique Aéronautique, qui commence à paraître en 1910, un article du colonel Renard qui démontre que la puissance pour un vol orthoptère devrait être beaucoup plus grande que pour un vol ornithoptère et que pour cette raison les oiseaux doivent être ornithoptères.

M. Etévé a étudié mathématiquement, dans le Génie Civil, 7 et 14 avril 1909, et la Technique Aéronautique 1910, l'influence d'oscillation de la masse pendue à un parachute sur la vitesse de descente de ce parachute, et ayant calculé que ces oscillations qui produisent une variation apparente périodique du poids supporté par le parachute ralentissent la vitesse de descente, il a tenté une étude analogue avec des ailes et le corps de l'oiseau ou de la machine volante.

« Mais, dit-il, il faut concilier le battement avec un autre procédé de propulsion ayant pour but de fournir le complément de travail nécessaire pour assurer la sustentation et pour vaincre la résistance que l'air oppose au mouvement horizontal de l'appareil. »

Il dit aussi :

« La progression est la conséquence du planement. »

Et ceci l'amène à concevoir un battement à incidence changeante que nous retrouverons aux études de M. M. Alayrac et L. Kahn.

M. Alexandre Sée, dans son livre « Les lois expérimentales de l'aviation », relate l'expérience du duc d'Argil, mais il pense que peut-être l'extrémité seule de l'aile dite « fouet » se déforme et joue un rôle propulseur qui remorquerait le reste de la voilure. Il reprend aussi la distinction orthoptère et ornithoptère pour calculer que le premier aurait besoin de 6 à 7 fois plus de puissance.

Et pourtant, à la même époque, Desmons, dans son livre « Le vol des oiseaux » 1910, reprend minutieusement les essais de H. Muller et de Marey et note dès l'origine que si l'on agite orthogonalement ou autrement dans l'air une aile d'oiseau, l'air s'échappe suivant le prolongement de la surface de l'aile.

Pour être complet, dois-je citer une hypothèse de M. Armen-gaud Jeune sur l'influence de l'électricité due au frottement sur les ailes de l'oiseau ?

C'est en 1910 également que paraît le livre de Painlevé et Borel, qui fut un des livres de chevet de ma jeunesse écolière. Là aussi furent mentionnés l'orthoptère et l'ornithoptère, et il faudra aller jusqu'à M. Oemichen pour lire qu'un oiseau qui s'élève verticalement ne bat pas à plat mais d'avant en arrière.

M. Oemichen a publié ses travaux sur l'oiseau et l'insecte dans « Nos maîtres les oiseaux » en 1920, avec pour sous-titre « Etude sur le vol animal et la récupération de l'énergie dans les fluides ».

Mes expériences ne m'ont pas permis de déceler une récupération d'énergie dans la forme de battement employée.

Avec Louis Breguet commencent les études mathématiques du battement, d'abord aux Comptes rendus 30 juin 1924, puis dans une petite brochure parue en 1925, « Le vol à voile dynamique des oiseaux ».

M. Breguet note que les battements de l'aile ont d'abord pour effet de propulser l'oiseau, puis, admettant la réciprocité des deux phénomènes : aile qui bat ou pulsation verticale du vent sur une aile fixe, il fait une sorte d'intégration des travaux nécessaires, et conclut que l'aile battante, même à plat, me disait-il un jour, a facilement un rendement supérieur à celui d'une voilure remorquée, ce rendement pouvant presque atteindre l'unité.

Mais tout en partageant la confiance de M. Breguet, je ne suis pas sûr que la réciprocité admise par lui soit licite, car une aile qui bat projette des tourbillons, et tous les procédés au laboratoire pour faire naître des pulsations verticales du vent en pro-

jettent donc également, de sorte que, notamment, dans les expériences de M. Katzmair, c'est dans une file de tourbillons alternés que navigue l'aile expérimentée.

M. Alayrac, dans le Bulletin technique N° 39 du Service technique de l'Aéronautique, en décembre 1926, est au contraire pessimiste.

Suivant des lois de battements simples et vraisemblables, il intègre les efforts connus par les essais normaux de soufflerie et son étude l'amène à craindre non seulement la difficulté de réalisation, mais aussi de mauvais rendements.

Par ordre chronologique, je dois placer ici une petite étude de M. Maurice Boel, « Le vol du pigeon » 1926, suite aux études de Marey.

En 1929, M. Louis Kahn a publié, en préface à l'étude d'une machine volante à aile battante, une plaquette, « La propulsion animale dans les fluides » où il essaye de justifier la définition générale :

« Un corps plongé dans un fluide et parcouru par des vibrations transversales se déplaçant de la tête vers la queue subit « de la part du fluide une poussée dirigée de la queue vers la « tête. »

Autrement dit, il s'agit d'une sorte de reptation, soit de tout le corps, soit d'élément du corps faisant une sorte de mouvement de godille.

On verra par mes expériences que, par exemple, avec une aile épaisse à l'avant et pointue à l'arrière aucun changement d'incidence n'est nécessaire pendant le battement pour assurer la propulsion.

Déjà, M. H. Bouasse, dans un copieux livre paru en 1928, « Résistance des fluides, vol des avions et des oiseaux, hélices et moulins à vent, manœuvre des navires », décrit un mouvement de godille comme une attaque oblique changeant de sens deux fois par battement complet, et leur assimile le coup de queue du poisson.

M. A. Magnan a repris, en imaginant des appareils remarquables, la cinématographie des oiseaux et des insectes, et, en collaboration avec M. Sainte-Laguë, a publié en 1933 un opuscule, « Vol au point fixe », où de curieux calculs l'ont amené à des conclusions qui, plus ou moins modifiées, ont étonné.

Enfin un expérimentateur, M. Budig, a fait battre des ailes et il les a fait battre non seulement dans l'air mais aussi dans l'eau, ce qui a permis de très bonnes mesures faites au laboratoire de Saint-Cyr, par M. Toussaint, assisté de M. Gruzon, mais M. Budig s'est tenu dans tous les cas à une loi de battement comportant un déplacement de l'aile le long de son envergure et il attribue à cette attaque oblique les résultats obtenus, ainsi qu'on peut le lire dans l'Aéronautique d'août 1938.

Je crois obtenir des résultats analogues sans attaque oblique.

J'en arrive alors à des travaux contemporains des miens, mais je les nommerai à cette place dans cette étude historique, car ils n'eurent aucune influence sur mes travaux.

M. P. Cicala, dans la Revue Aérotecnica de août, septembre, novembre 1936, mai 1937 et avril 1938, essaye d'appliquer les équations de Prandtl-Birnbaum à une aile vibrante et entreprend de longs calculs dont je crains de n'avoir pas saisi tout le sens, d'autant que les articles sont en italien.

M. Cicala porte son attention sur la portance et les moments et il paraît considérer que les vibrations ont peu d'action.

Il contrôle ses calculs par des expériences sur une petite aile encastrée à la base et placée dans une petite soufflerie à Turin. D'après mes essais, une telle aile doit donner des résultats très petits.

M. Cicala conclut de ses essais que les théories connues peuvent s'appliquer dans certains cas.

M. R. Egloff, dans Flugsport du 22 décembre 1937 et 5 janvier 1938 donne un compte rendu d'essais faits en faisant battre des ailes de différents oiseaux, montées en manège ; dans ces con-

ditions, il donne des courbes de sustentation et de poussées qui permettent de comparer entre elles ces différentes ailes.

M. Antoine Magnan, dans une note aux Comptes rendus du 7 février 1938, étudie, en collaboration avec MM. Charles Perillat-Botonet et Henry Girerd, des tourbillons de fumée derrière un pigeon, l'axe de ces tourbillons étant, disent-ils, à l'intersection du plan de symétrie de l'animal et du plan de la queue.

M. Maurice Denis, (note aux Comptes rendus du 21 février 1938, présentée par M. H. Villat), a fait des essais sur une aile en soufflerie qui, à certains régimes, entrainait d'elle-même en vibration et il a tracé deux polaires comparables, avec et sans vibrations, ce qui lui permet de remarquer une hypersustentation de 30 % avec un Cx accru à peu près d'autant.

M. Denis pense que la vibration est due à l'émission derrière une aile mince de tourbillons alternés et fait remarquer le chiffre élevé de l'hypersustentation.

Dans l'esprit de beaucoup d'inventeurs, le vol par battement serait le procédé idéal pour voler par la seule force humaine.

M. Giovanni Serragli écrit dans ce sens, dans « l'Aerotecnica » de novembre 1938. J'y trouve un essai intéressant d'hélice battant par déplacement le long de son axe de rotation, mais il s'agit d'une hélice à pales flexibles. D'ailleurs, M. Serragli conseille pour le battement des ailes minces et flexibles.

Enfin M. Villat a bien voulu présenter, à la séance de l'Académie des Sciences du 20 mars 1939, une note que je lui avais soumise, montrant qu'une vibration commandée est *propulsive* et *hypersustentatrice*, on trouvera cette note en annexe.



Je n'ai pas cru devoir citer, dans cette étude historique, d'assez nombreuses études sur les vibrations des ailes qui n'ont eu pour but que le point de vue mécanique et notamment, soit la résistance des matériaux, soit l'amortissement des vibrations.

Je m'en suis tenu aux travaux qui ont cherché la relation entre les battements ou vibrations et l'aérodynamique de l'aile.



C'est en septembre 1937 que je fus trouver M. le professeur Toussaint, pour lui exposer que je souhaitais rechercher au laboratoire si une aile battante est autpropulsive dans des conditions utilisables dans l'air et dans l'eau, et rechercher les lois de battement et les conditions de réalisations nécaniques, notamment aux fréquences élevées.

Je souhaitais aussi appliquer ces recherches aux trajectoires circulaires, par exemple, aux hélices et notamment aux hélices sustentatrices.

Qu'il me soit permis de marquer ici toute ma gratitude à M. Toussaint, qui me reçut le mieux du monde, comme à son habitude, et m'autorisa à préparer des maquettes d'essai en me conseillant de me rappeler que les essais dans l'eau sont souvent plus commodes que dans l'air.

Depuis cette époque, j'ai fait quelque mille mesures au laboratoire de Saint-Cyr, la plupart dans l'eau et comportant souvent sept lectures, et je m'excuse, étant parfois fort occupé par ailleurs, d'avoir mis si longtemps pour un aussi faible bagage.

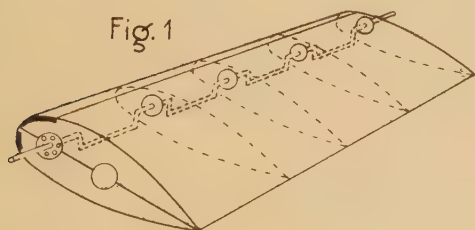


ESSAIS PRELIMINAIRES

ESSAIS SUR LA BALANCE DU LELARGE

J'ai réalisé, en novembre 1937, une maquette en bois conforme au dessin ci-contre, et ayant les dimensions suivantes :

Fig. 1

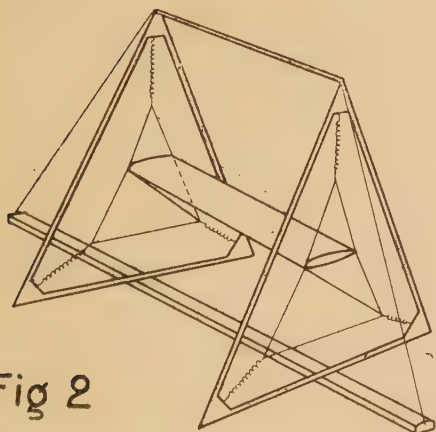


Envergure = 100 cm
Corde = 20 cm
Epaisseur = 5 cm

Profil Royer biconvexe symétrique.

Cette aile creuse, comme on le voit, contient des balourds commandés de l'extérieur et propres à la faire battre. (Brevet français du 20 septembre 1937.)

Fig 2



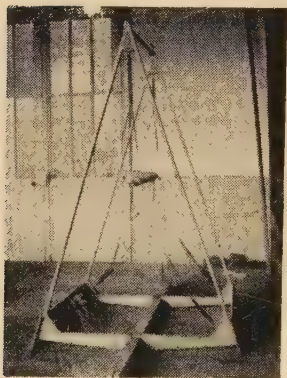
Pour pouvoir employer cette maquette en tous endroits utiles, je l'ai montée dans un cadre représenté à la fig. 2, et par la photographie N° 1.

On voit que l'aile est entièrement portée par des liens élasti-

ques qui lui permettent de battre, mais qui par les liaisons du bas en forme de N maintiennent l'incidence sensiblement constante, tout en permettant de la régler facilement.

Ce cadre peut commodément être monté en tous lieux, simplement en fixant par des presses le madrier de la partie inférieure.

photo 1

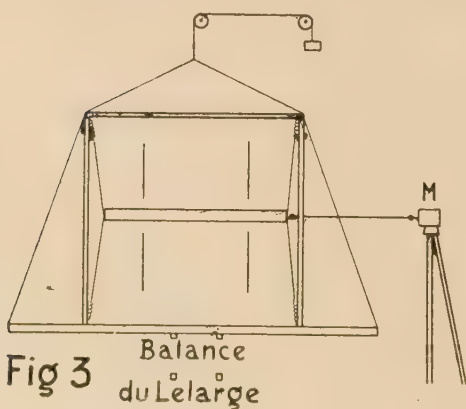


On peut envisager également de placer dans la soufflerie des parois qui permettraient l'essai en courant plan, en n'utilisant pas toute l'envergure de la maquette, et dans ce cas aucune résistance parasite ne subsisterait dans le vent, ce qui est important si l'on doit avoir à mesurer des efforts faibles.

Une commande souple permet de faire tourner depuis le moteur la pièce porteuse des balourds.

Cette installation a tout d'abord montré que l'aile souffle des tourbillons vers l'arrière (tourbillons rendus visibles par de la fumée) quand elle oscille verticalement à plat avec une fréquence de 4 à la seconde et une amplitude, entretenue à la main, de 10 cm environ.

En février 1938, cette installation fut fixée sur la balance du



Lelarge à Saint-Cyr, suivant la fig. 3, où l'on remarquera le contrepoids qui équilibre son poids, et munie d'un moteur à répulsion induction tournant à environ 1420 tours/mi-
nute, soit à une fréquence de 23,5 à la seconde.

Dans ces conditions, l'aile était animée d'un mouvement de translation

circulaire d'environ 9 mm. de rayon et la force de propulsion mesurée a paru être de 30 à 50 grammes.

VISUALISATION DES TOURBILLONS PROPULSIFS DE L'AILE BATTANTE

Entre temps, à la demande de M. Toussaint, M. Ras a déplacé dans la cuve à eau à faces parallèles de l'Institut de Saint-Cyr, des sections d'ailes biconvexes symétriques qui ont montré l'existence de tourbillons propulsifs, ainsi que l'on peut le voir sur la photographie ci-dessous prise par lui.

Photo 2



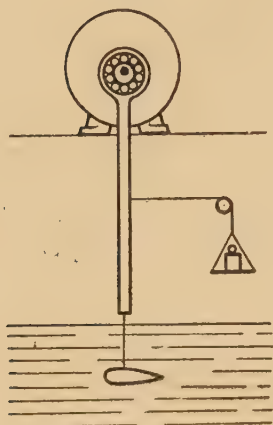
Cette photographie est prise au moment d'un battement brusque vers le bas un peu avant l'arrêt du profil.

BATTEMENTS PROPULSIFS DANS L'EAU

Dans le même temps, j'ai réalisé le mécanisme de la figure 4, visible aussi figure 5.

Un moteur à courant alternatif tournant à 1420 tours/minute

Fig 4



environ porte à l'extrémité de son arbre un roulement à billes excentré de 6 mm. La cage extérieure de ce roulement porte une pièce de 60 cm. de long à l'extrémité de laquelle est une maquette de métal d'une aile biconvexe symétrique de dimensions : envergure = 19 cm. ; épaisseur = 1 cm. ; corde = 5 cm.

Quand le moteur tourne, l'aile décrit un mouvement de battement à plat presque exact étant donnée la faible excentricité.

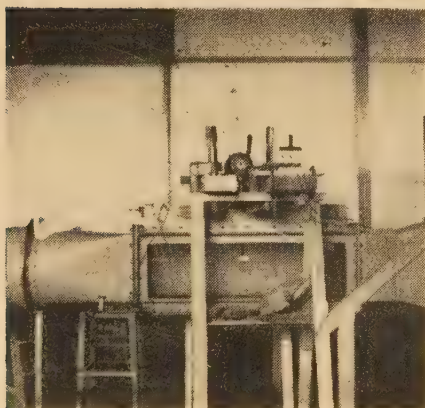
La poussée est mesurée comme on le voit sur la figure en ramenant la tige à être verticale.

La poussée dans ces conditions en battant dans l'eau est de 300 grammes (+ ou - 10 grammes).

Cette installation montée dans la soufflerie hydrodynamique de Saint-Cyr avec un courant d'eau d'environ 0,50 mètre/seconde a donné sensiblement la même poussée.

On voit aux photos 3 et 4 l'aspect de cette installation.

Photos 3 et 4

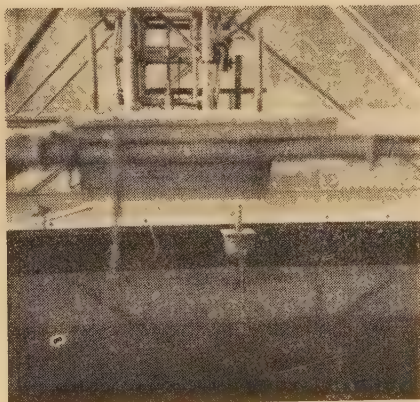
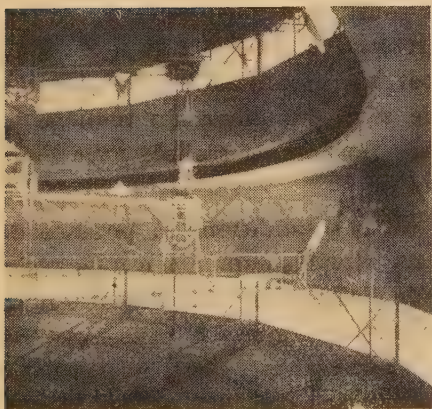


BATTEMENTS AU MANÈGE HYDRODYNAMIQUE

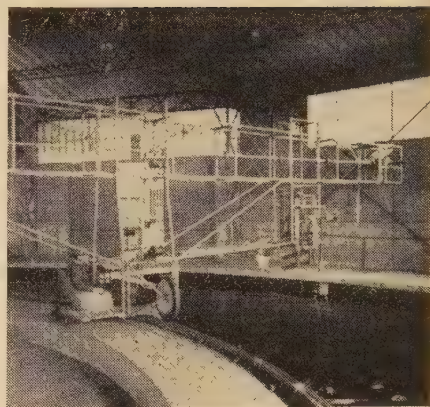
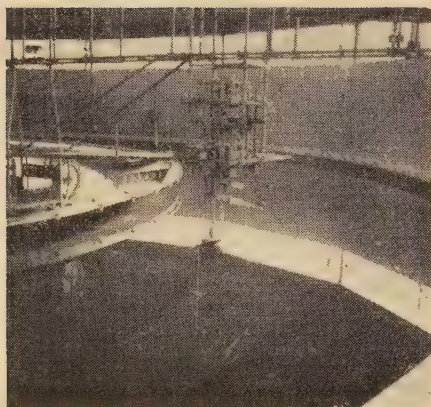
Il m'a paru dès ce moment intéressant d'obtenir une vitesse de courant plus grande et notamment de rechercher pour quelle vitesse la poussée serait annulée.

J'ai donc porté mon dispositif oscillant au manège circulaire de Saint-Cyr où je l'ai monté, comme le montrent les photographies 5, 6, 7 et 8.

Photos 5 et 6

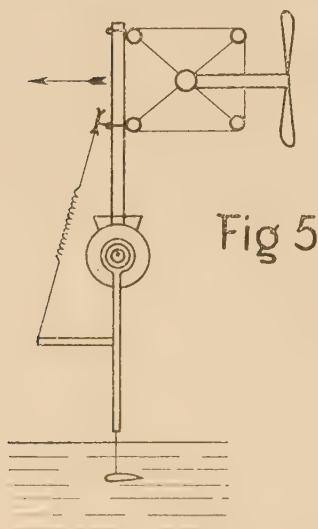


En faisant tourner le manège pendant que l'aile oscille, il a fallu une vitesse de translation de 2,12 mètres/seconde pour que la tige qui porte l'aile reste verticale, c'est-à-dire pour que la poussée due au battement égale la résistance à l'avancement de l'aile et de la tige support.



Pour diminuer approximativement la résistance de la tige, j'ai réalisé le dispositif de la figure 5.

En déplaçant la tige sans aile à différentes vitesses, la tension d'un ressort ramène la tige à la verticale par une commande repérable depuis le siège du pilote du manège et la même tension est réalisée avec l'aile en place.



Dans ces conditions la poussée de l'aile est sensiblement égale à la résistance de l'aile pour une translation de 4,60 mètres/seconde. A cause des repérage nécessaires, cette mesure est très imprécise.

Il résulte des essais ci-dessus qu'une aile biconvexe symétrique battant orthogonalement est *autopropulsive* même au point fixe.

Etant entendu par point fixe qu'il n'y a pas de translation, mais en réalité l'aile engendre un courant relatif.

PROGRAMME D'ESSAIS

Dès lors, je me proposais le programme suivant :

Si j'appelle N la fréquence à la seconde

A l'amplitude du mouvement

L la dimension linéaire de la maquette

d la densité du fluide

P_x la poussée.

- Recherche de la fonction $P_x = f(N, A, L, d)$.
- Voir comment cette fonction varie en fonction de V vitesse de translation et pour diverses incidences.
- Etudier la sustentation dans diverses conditions.
- Etudier divers profils.
- Mesurer les puissances employées pour trouver une fonction :
$$W = f(N, A, L, d)$$

et de même que ci-dessus pour diverses incidences et pour diverses valeurs de V .
- Faire quelques essais en trajectoires circulaires pour réaliser une hélice battante.



PREPARATION DE LA SOUFFLERIE HYDRODYNAMIQUE

La soufflerie hydrodynamique de Saint-Cyr est conforme au schéma de la figure 6.

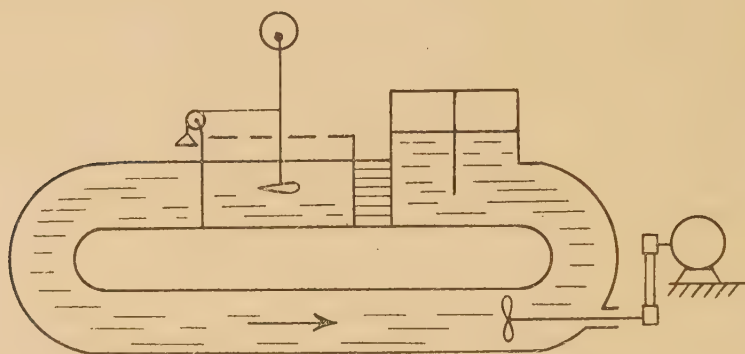


Fig 6

La chambre d'expériences est garnie de glaces aux faces latérales et inférieures, et la surface de l'eau est normalement libre.

La vitesse des courants d'eau était au début de mes expériences variable de 0 à 0,50 mètre/seconde environ.

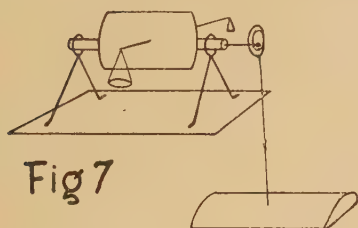
Cette vitesse était mesurée au moyen d'un tube de Pitot ordinaire, et était réglable par une transmission à friction entre le moteur et l'hélice.

Quand le remplissage est correct la surface est assez peu perturbée.

Au-dessus de la surface libre de l'eau, j'ai installé un échafaudage pesant et lesté par des masses de plomb.

Cet échafaudage porte un moteur électrique conforme à la figure 7 et surceptible d'osciller autour de son axe pour pouvoir mesurer les couples.

Comme de plus l'aile montée suivant le schéma de la figure 4, peut osciller autour de l'axe longitudinal du moteur, j'avais donc la possibilité de mesurer les poussées P_x .



Les premières expériences furent faites avec un moteur à vitesse constante qui fut presque aussitôt remplacé par un moteur universel Ragonot de $1/2$ cheval, alimenté en courant continu et

dont la vitesse pouvait être réglée avec une grande précision au moyen d'un rhéostat.

Un inverseur permettait également de varier le sens de rotation.



AUTOPROPULSION DE L'AILE BATTANTE

Ces essais furent faits avec trois ailes biconvexes symétriques, profil Royer, à peu près semblables, et des dimensions suivantes :

Grande aile	Envergure	400 mm
	Corde	100 mm
	Epaisseur	20 mm
Aile moyenne	Envergure	190 mm
	Corde	50 mm
	Epaisseur	10 mm
Petite aile	Envergure	100 mm
	Corde	25 mm
	Epaisseur	5 mm

Ces essais furent faits en courant d'eau à vitesse nulle, sauf à noter une fois pour toutes que ce point fixe n'est jamais rigoureux, car le battement engendre un léger courant. On verra par la suite que ce léger courant, dans la limite des expériences, change les mesures d'une façon insignifiante et inférieure aux erreurs expérimentales.

J'ai complété mon dispositif de commande des oscillations en réalisant l'excentrique suivant le schéma de la figure 8, qui permet de faire varier l'excentricité de 2 à 18 mm. avec un repérage exact aux positions 2, 6, 10, 14 et 18.

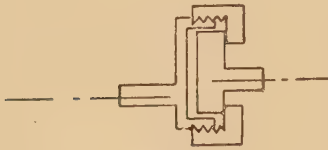
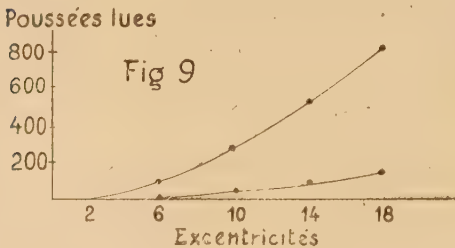


Fig 8

Pour ces essais le moteur était un moteur monophasé à répulsion-induction de 1/2 cheval, tournant à une vitesse à peu près uniforme de 1420 tours/minute.

Pour éliminer l'influence du sens de rotation qui tend, par le léger frottement dans le roulement à billes de la figure 4, à entraîner le support d'aile dans un sens ou dans l'autre, j'ai fait toutes les expériences dans les deux sens et pris la moyenne. Les



résultats se placent sur les courbes ci-contre et se rapportent à l'aile moyenne et à la petite aile, figure 9.

Il faut noter que la grande aile a pour envergure la largeur de la soufflerie et est donc expérimentée en écoulement plan équivalent à une envergure infinie.

Il faut noter qu'à l'excentricité 2 les chiffres sont difficilement mesurables et que la vibration du montage est importante par rapport au battement.

J'ai donc réuni dans le tableau ci-dessous (tableau 1) les mesures les meilleures.

TABLEAU 1

Excentricite	6	$\frac{10^2}{6^2} = 2,8$	10	$\frac{14^2}{10^2} = 1,95$	14	$\frac{18^2}{14^2} = 1,65$	18
Petite aile	25	2,5	62,5	1,63	102,5	1,5	153
rapport des surfaces = 4	4		4,8		5,1		5,1
aile moyenne	100	3	300		540	1,5	800

Il résulte de ce tableau que, à 1420 tours/minute,

P_x peut être de la forme $P_x = f (A^3 L^2)$

Nous étudierons plus loin les valeurs numériques.



AUTOROTATION D'UNE HELICE BATTANTE

En même temps, j'ai eu la curiosité d'essayer une hélice en autorotation réalisée suivant le schéma de la figure 10, et la photo 9.

On y voit une hélice monopale à profil biconvexe symétrique, la pale a les dimensions :

Photo 9

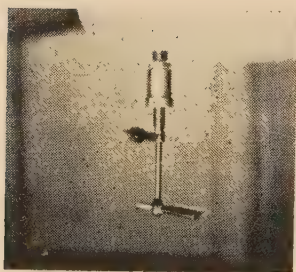
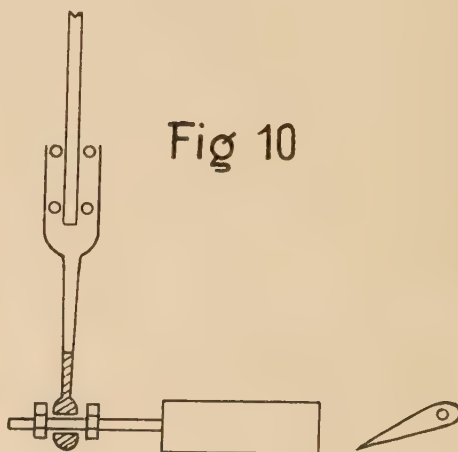


Fig 10

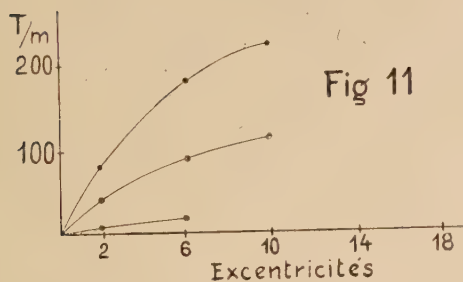


Envergure	=	113 mm
Corde	=	40 mm
Epaisseur	=	10 mm

L'incidence est facile à régler, de même que le diamètre qui fut au début de 300 mm.

J'ai donc animé cette hélice d'un mouvement oscillatoire, suivant une loi sensiblement sinusoïdale, le long de son axe de rotation à une vitesse uniforme de 1420 battements par minute et à des excentricités variables.

Les courbes tracées sur la figure 11 correspondent respectivement aux incidences 0° , 12° et 40° .



Il est très remarquable que l'hélice tourne dans ces conditions même à des incidences très élevées.

Je n'ai pas pu faire d'essais aux battements supérieurs à 10 mm. d'amplitude, car les vitesses deviennent très grandes.

AUTOPROPULSION EN TRANSLATION

Ces essais eurent d'abord pour but de confirmer quelques précédents essais, notamment sur la grande aile.

Je souhaitais aussi connaître les vitesses de translation qui annulent les poussées, et qui dans le cas d'une aile battante correspondraient au régime de vol.

Dans ce but, je montai la grande aile au manège et j'établis deux points sans déduire l'influence de la tige.

Pour $E = 2$ j'ai trouvé 1m20 pour $P_x = 0$

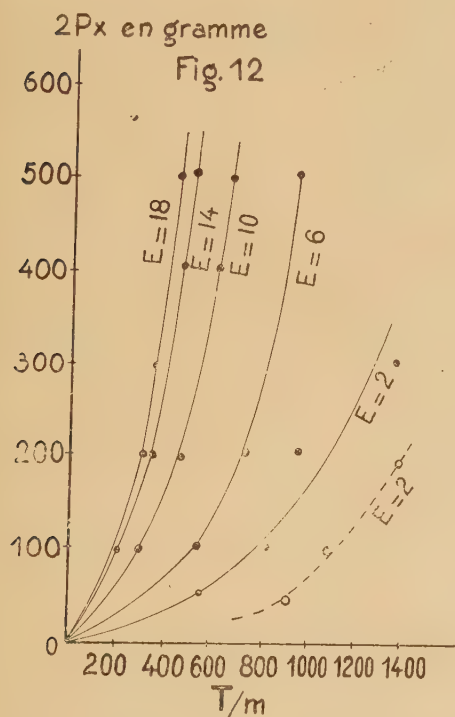
Pour $E = 6$ j'ai trouvé 2m35 pour $P_x = 0$

Ces expériences s'avérant difficiles et longues, je les reprendrai plus tard à la soufflerie hydrodynamique.

AUTOPROPULSION A DIVERSES VITESSES

A partir de ce moment le moteur à vitesse fixe fut remplacé par un moteur à vitesse variable réglable par un rhéostat.

Les essais furent continués sur la grande aile. Ils se lisent sur les courbes de la figure 12, ci-dessous, et les deux tableaux 2 et 3.



Sur la figure 12, les courbes en trait plein indiquent la valeur de $2Px$ en fonction de la vitesse en tours/minute et pour les amplitudes de battements 2, 6, 10, 14 et 18 millimètres.

Sur le tableau 2 j'ai sur la première ligne horizontale, écrit entre les chiffres de vitesse le rapport de leurs carrés.

Sur la première ligne verticale, les rapports des carrés des amplitudes.

Ce tableau donne alors les valeurs de $2Px$, et entre elles les valeurs des rapports de leurs carrés.

Pour vérification j'ai construit le tableau 3 qui indique, par diverses valeurs de $2Px$ et de A , les valeurs de $N^2 A^2$

Tableau N° 2

Vitesses T/min.											
	200	4	400	2,25	600	1,75	800	1,25	1000	2	1400
A = 2			26	2,13	55	1,18	100	1,65	165	2,4	400
9			2,5		2,25		2,65		3,6		
A = 6			65	1,76	125	2,15	270				
2,75			2,3		3,2						
A = 10	50	3	150	2,65	400						
1,95	2		2		1,75						
A = 14	100	3	300	2,25	675						
1,65	1,1		1,1		1,5						
A = 18	110	3	335	3	1000						

Sauf une anomalie pour $A = 2$ on vérifie bien la formule

$$P_x = f (N^2 A^2)$$

et me rappelant les essais précédents, peut-être a-t-on

$$P_x = .f (N^2 A^2 L^2)$$

— Anomalies pour $A = 2$. — Essais pour mesurer les puissances —

J'ai essayé de rechercher les causes de l'anomalie pour $A = 2$.

A cet effet j'ai changé le sens de rotation et la moyenne des courbes pour $A = 2$ s'écrit en pointillé sur la figure 12 Il y a atténuation de l'anomalie.

Ce sont ces chiffres rectifiés qui s'inscrivent sur le tableau 3.

Tableau N° 3

$2 P_x = 100$		$N^2 A^2$
		$A = 2$ $= 6$ $= 10$ $= 14$ $= 18$
		40 108 90 80 104
		$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 108 \\ 90 \\ 80 \\ 104 \end{array} \right\} \text{moyenne}$ 96
$2 P_x = 200$	$A = 2$ $= 6$ $= 10$ $= 14$	68 186 211 225
		$\left. \begin{array}{l} 68 \\ 186 \\ 211 \\ 225 \end{array} \right\}$ 206
$2 P_x = 400$	$A = 6$ $= 10$ $= 14$	300 372 430
		$\left. \begin{array}{l} 300 \\ 372 \\ 430 \end{array} \right\}$ 375
$2 P_x = 500$	$A = 6$ $= 10$ $= 14$ $= 18$	330 490 600 640
		$\left. \begin{array}{l} 330 \\ 490 \\ 600 \\ 640 \end{array} \right\}$ 515

Je crois que pour $A = 2$ les vibrations de mon installation restent importantes par rapport au débattement.

Sinon il faudrait croire à une amélioration du coefficient dans les très petits battements.

Ce même jour, pour voir la possibilité de la méthode, j'ai fait quelques mesures de puissance avec : $A = 2$ et $A = 6$

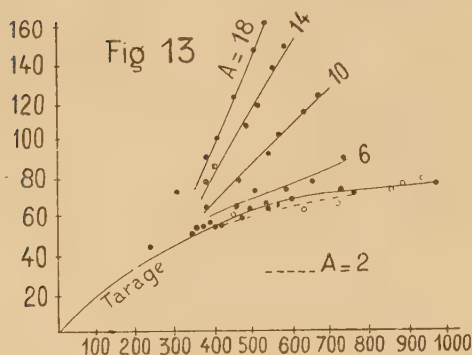
Sans déduire aucune tare, il fut trouvé :

Pour $A = 2$, des puissances de $1/75$ à $1/25$ de cheval
pour des poussées de 15 à 30 grammes.

Pour $A = 6$, des puissances de $1/100$ à $1/50$ de cheval
pour des poussées de 38 à 95 grammes.

MESURES DE PUISSANCE

Ces mesures furent faites avec la grande aile.



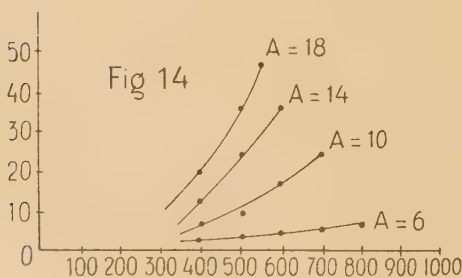
La figure 13 représente les couples lus en fonction de la vitesse et pour diverses excentricités, on notera là également une certaine incertitude pour $A = 2$.

Sur cette même figure, j'ai porté une courbe dite de tarage qui indique la valeur des couples pour le

mécanisme d'expérience fonctionnant avec l'aile enlevée.

Ces mesures de tarage furent faites avec différentes excentricités mais on voit qu tous les points (19) se situent sur une même courbe.

En possession des courbes de la figure 13, en retranchant les couples du tarage des couples lus, on a les couples vrais et leur produit par la vitesse donne des valeurs proportionnelles aux puissances. La figure 14 représente ces courbes.



Je ne les donne pas avec une absolue sécurité, car ces essais ont souffert à certains régimes de vibrations fort gênantes.

J'ai néanmoins précisé les chiffres de puissance en les écrivant en 1/1000 de chevaux dans le tableau 4 en fonction de N et de A .

Tableau N° 4

TOUR/ MINUTE										
	400	$\frac{500}{400}^3 = 1,95$	500	1,7	600	1,6	700	1,5	800	
A = 6	$\frac{0,43}{1000}$	1,7	0,72	1,5	1,1	1,35	1,5	1,4	2,15	
2,75 ?	2,3		2,8		3,4		4			
A = 10	1	2	2	1,8	3,7	1,6	6			
1,95	1,85		2,15		2	Les puissances sont en $\frac{1}{1000}$ HP				
A = 14	1,85	2,3	4,3	1,75	7,6					
1,65	1,5		1,5							
A = 18	2,75	1,6	4,5	1,45	6,5	1,4	9,3			
	400	1,4	450	1,3	500	1,3	550			

Ce tableau semble indiquer : $W = f(N^3 A^{\text{entre 2 et 3}})$

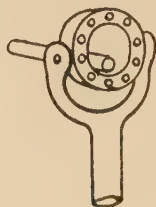
Je reprendrai plus tard avec plus de précision cette formule qui est de la plus grande importance.

REDUCTION DES RESONANCES

Divers essais et diverses modifications m'amènèrent à penser que les vibrations qui me gênèrent à diverses vitesses et qui n'existaient pas avec le moteur à vitesse fixe étaient dues à des phénomènes de résonance. Ces vibrations furent entièrement détruites en suspendant l'aile à un axe horizontal perpendiculaire à l'axe horizontal autour duquel elle oscillait déjà.

La figure 15 représente ce dispositif.

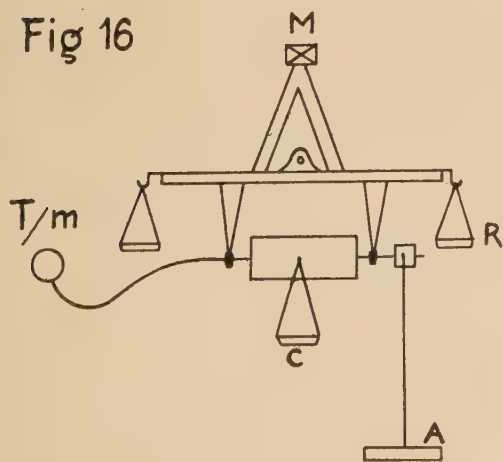
Fig. 15



HYPER SUSTENTATION DE L'AILE BATTANTE

Pour compléter la balance et pouvoir mesurer les poussées de l'aile je fis ajouter un axe d'oscillation perpendiculaire à l'axe du moteur.

Fig 16



La figure 16 ci-contre et la photo 10 donnent une idée de ce dispositif.

On voit en A l'aile à essayer vue suivant son envergure.

en M, le moteur susceptible d'osciller autour de son axe ; le poids mis dans le plateau C, servant à mesurer le couple, et les plateaux R, permettant de mesurer les poussées verticales de l'aile.

Photo 10



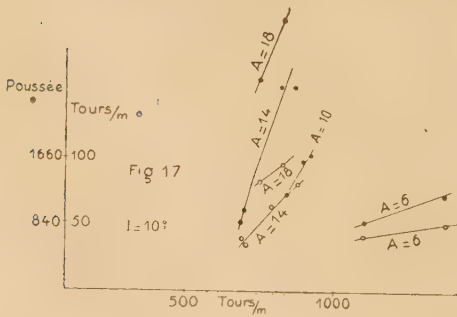
On remarquera en *m* une masse réglable qui permet de régler la sensibilité de la balance.

Pour les premiers essais à incidence variable, j'admis d'incliner la tige portant l'aile, méthode à corriger par la suite car elle introduit une erreur notable dès que l'incidence dépasse quelques degrés.

Pour cette raison je ne donne pas les chiffres mesurés qui m'indiquèrent simplement qu'il existe en plus de l'autopropulsion de l'aile battante une notable hypersustentation.

L'HELICE BATTANTE SUSTENTATRICE

J'ai noté ces premiers essais d'hélice battante sustentatrice sur la figure 17, faits à l'incidence constante de 10° .



Les courbes marquées par des points donnent les poussées en grammes en fonction des tours/minute pour les amplitudes de 18 mm., 14 mm., 10 mm. et 6 mm.

Les courbes marquées par des petits cercles donnent les tours/minute de l'hélice en fonction des tours/minute du moteur.

Je n'ai pas osé faire état des mesures de puissance.

MESURES DE L'HYPERSUSTENTATION

Malgré la méthode incorrecte (inclinaison de la tige support

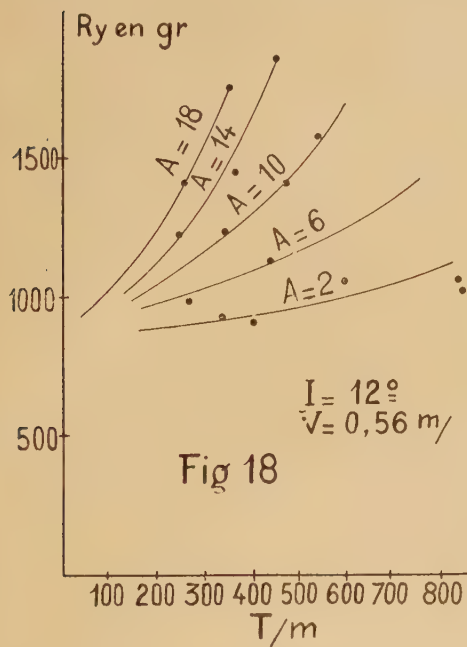


Fig 18

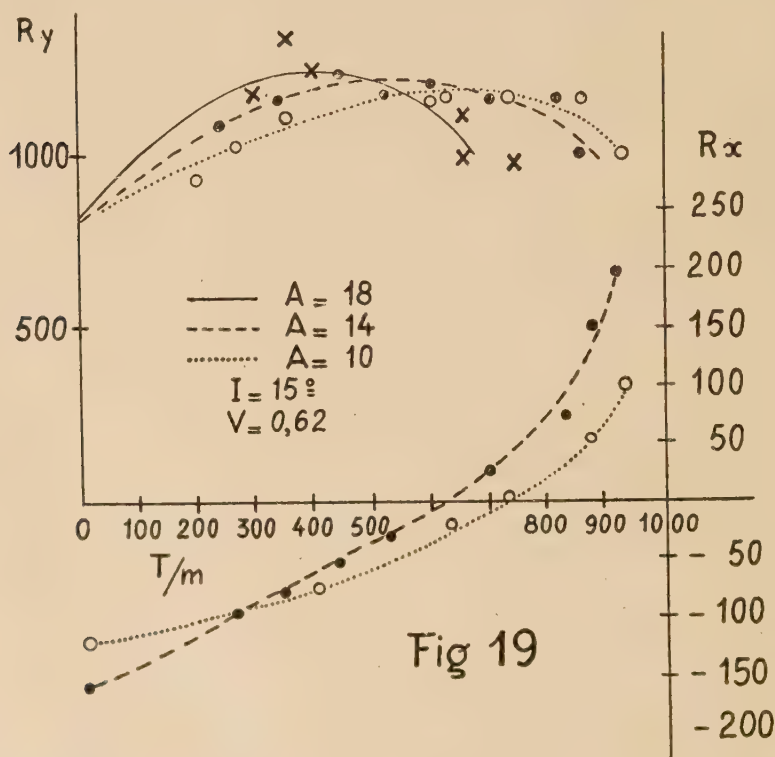
pour varier l'incidence) je reproduis ci-contre, fig. 18, un faisceau de courbes fait à une incidence constante de 12° donnant pour divers battements $A = 2, 6, 10, 14$ et 18 la valeur de la poussée R_y en fonction de la vitesse du battement. La vitesse du courant d'eau était d'environ $0,56$ mètre/seconde.

J'ai vu par la suite que les chiffres obtenus pour R_y étaient trop forts, mais l'allure des courbes reste intéressante.

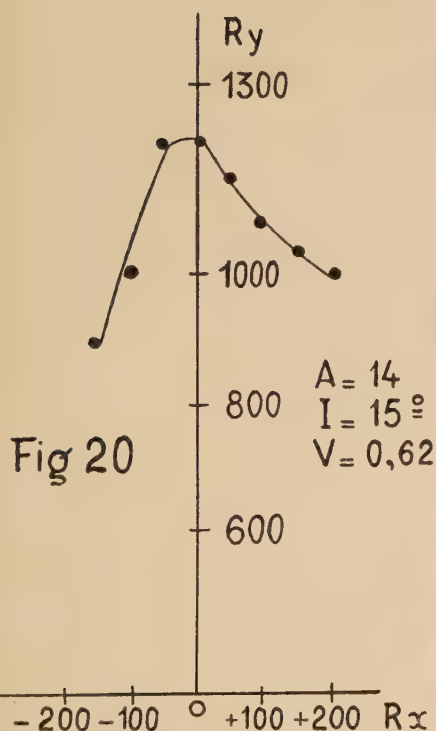
Peu après, j'ai refait un certain nombre d'essais en changeant le sens de rotation, craignant qu'il ait une petite influence sur la loi de battement, et fut rassuré de ce côté.

POLAIRE DE L'AILE BATTANTE

Il m'a paru intéressant de rechercher, avant d'aller plus loin, comment, dans les conditions de l'expérience, R_y et R_x varient en fonction de la vitesse et aussi R_y varie en fonction de R_x pour tracer ainsi une polaire comme on en a l'habitude pour l'aile non battante.



On voit, à la partie supérieure de la figure 19, diverses courbes donnant R_y en fonction de la vitesse, et à la partie inférieure les courbes correspondantes donnant R_x .



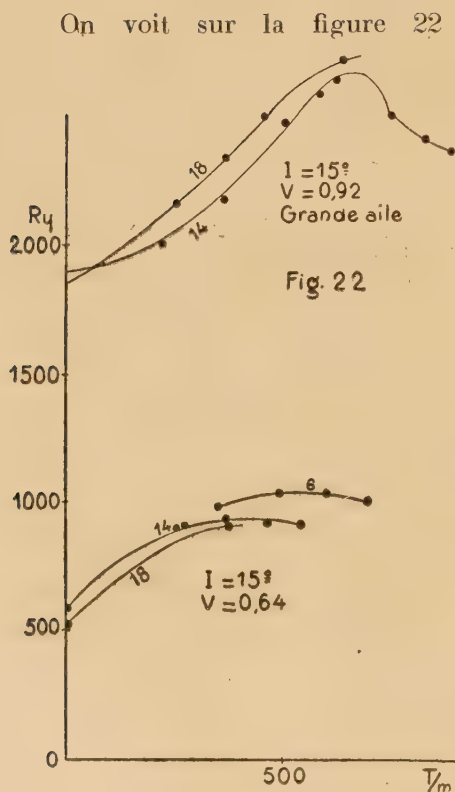
Ces courbes ont permis de tracer la polaire de la figure 20 donnant R_y en fonction de R_x .

Photo 11



POLAIRES DIVERSES, GRANDE AILE BICONVEXE SYMETRIQUE

A partir de ces essais, j'ai modifié le support de l'aile battante, comme le montre la figure 21, de façon à permettre à la tige support d'être toujours verticale quelle que soit l'incidence de l'aile. On voit ce montage également sur la photo 11.



L'incidence constante de 15° fut employée tandis que variaient l'amplitude du battement et la vitesse du courant d'eau.

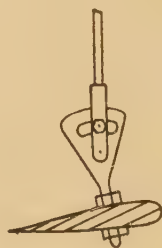


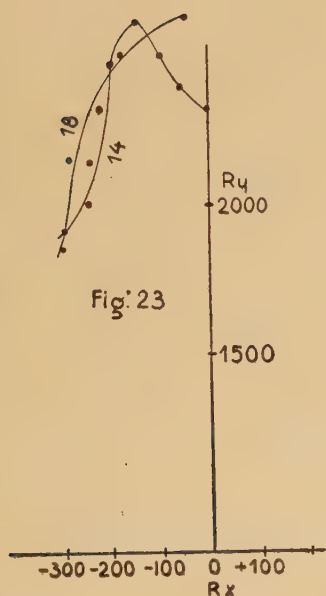
Fig 21

On notera que l'amplitude semble avoir peu d'influence sur ces courbes :

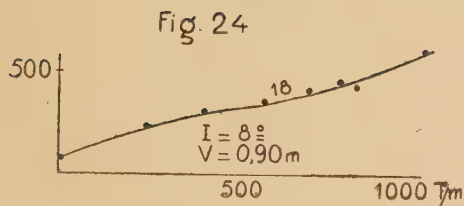
En calculant le C_z équivalent dans l'air, on trouve pour l'aile fixe 110 et à 10 battements par seconde on a 160.

De même que plus haut j'ai tracé, figure 23, deux polaires extraites des courbes de la figure 22.

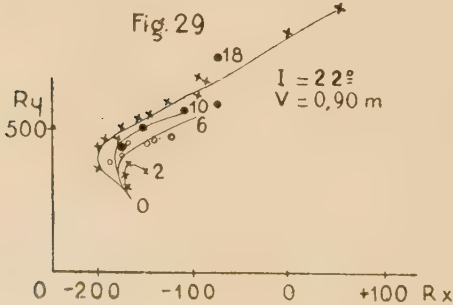
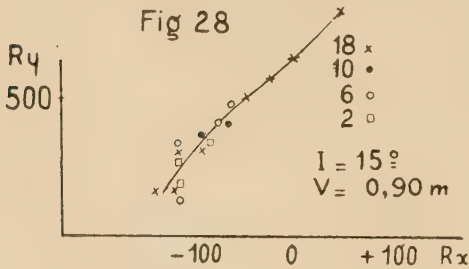
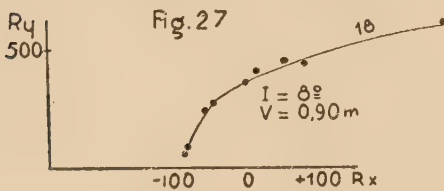
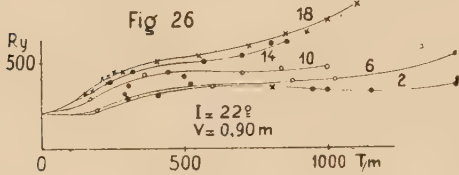
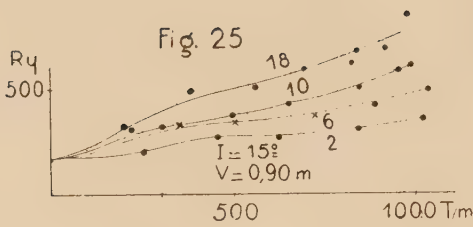
Ces polaires sont très intéressantes ; elles montrent un grand accroissement de R_y avec le battement et en particulier au moment où le battement a amené C_x au voisinage de O , c'est-à-dire dans le cas d'une aile volant librement en régime de vol.



POLAIRES DE L'AILE MOYENNE



J'ai tracé sur les figures 24, 25 et 26, les courbes donnant R_y pour diverses amplitudes et à diverses vitesses de battement et pour les incidences de du courant d'eau étant 8° , 15° et 22° , la vitesse maintenue constante à 0,90 minute/seconde.



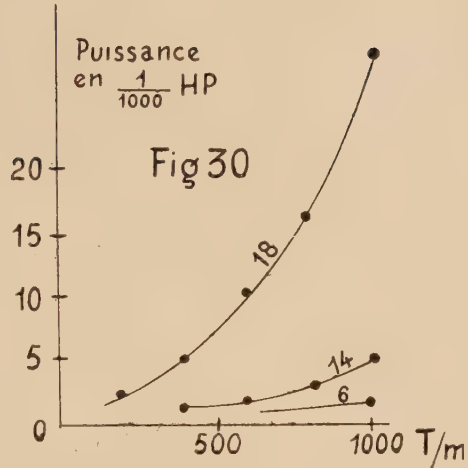
Ces courbes ont été comme précédemment transformées en polaires $R_y = f(R_x)$ tracés aux figures 27, 28 et 29.

Ces polaires sont très intéressantes : Elles montrent un très grand accroissement de R_y avec le battement.

On notera aussi qu'à l'incidence de 15° toutes les courbes sont confondues et simplement décalées pour des battements allant de 2 à 18 mm.

Ces essais ont été également accompagnés de mesures de puissance que j'ai notées sur les courbes de la figure 30. Ces courbes donnent la puissance en 1/1000 de cheval en fonction de la vitesse du battement.

Ces courbes diffèrent de celles, précédemment obtenues, car le courant d'eau y a une vitesse non nulle et égale à 0,90 mètre/seconde, l'incidence étant de 15°.



On voit sur ces courbes que W paraît varier en fonction de A^3 et d'une puissance de N, située entre 2 et 3.

Ces courbes souffrent toujours de la difficulté qu'il y a à mesurer un grand nombre de chiffres en même temps et aussi de petites erreurs sur le tarage sans aile.

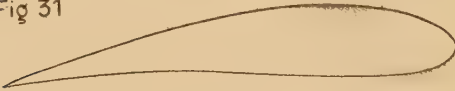
Je reviendrai sur ces questions de puissance plus tard.



AILE BATTANTE A PROFIL CREUX

J'ai fait construire deux maquettes d'ailes porteuses suivant le profil représenté ci-dessous, à la figure 31.

Fig 31



Ces ailes avaient les dimensions :

Aile moyenne :

Envergure = 200 mm

Corde = 60 mm

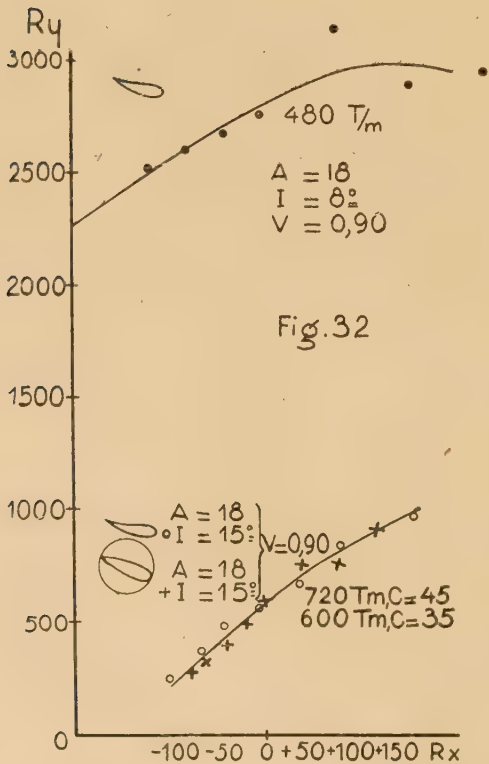
Epaisseur
maximum = 10 mm

Grande aile :

Envergure = 400 mm

Corde = 120 mm

Epaisseur
maximum = 20 mm



Pour la grande aile, j'ai tracé la polaire

$$R_y = f(R_x)$$

qui se trouve au haut de la figure 32 et de même en bas pour l'aile moyenne.

De plus, en bas de cette figure se trouve la polaire de l'aile moyenne biconvexe symétrique munie à chacune de ses extrémités de flasques circulaires min-

ces dont le diamètre est égal à la corde de l'aile.

On voit que :

Les courbes des deux ailes moyennes se superposent exactement.

Comme précédemment Ry est beaucoup plus amélioré pour une aile moyenne donc d'envergure limitée que pour la grande aile en écoulement plan.

Il m'a paru intéressant de comparer les puissances employées pour un même point des courbes inférieures, et je trouve :

pour l'aile porteuse :

$t/\text{min} = 600$, couple proportionnel à 35, W proportionnel à 21

pour l'aile biconvexe avec flasques :

$t/\text{min} = 720$, couple proportionnel à 45, W proportionnel à 31

La puissance nécessitée par l'aile biconvexe paraît dans les conditions de l'expérience notablement plus grande que celle nécessitée par l'aile porteuse.

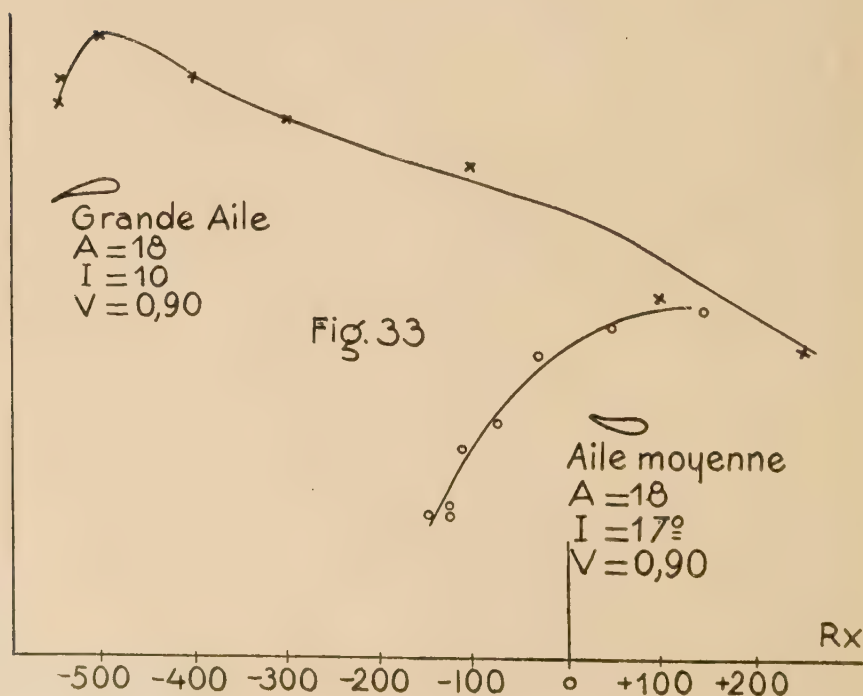


ANOMALIES DUES A LA SOUFFLERIE HYDRODYNAMIQUE

Continuant les essais précédents, j'ai tracé la courbe au bas de la figure 33, donnant $R_y = f(R_x)$ pour l'aile porteuse moyenne avec $I = 17^\circ$.

Puis, j'ai voulu me rendre compte de ce qui se passerait si au lieu de prendre comme jusqu'à ce jour une incidence défléchissant l'eau vers le haut, c'est-à-dire vers la surface libre du liquide, je défléchissais vers le fond de l'eau.

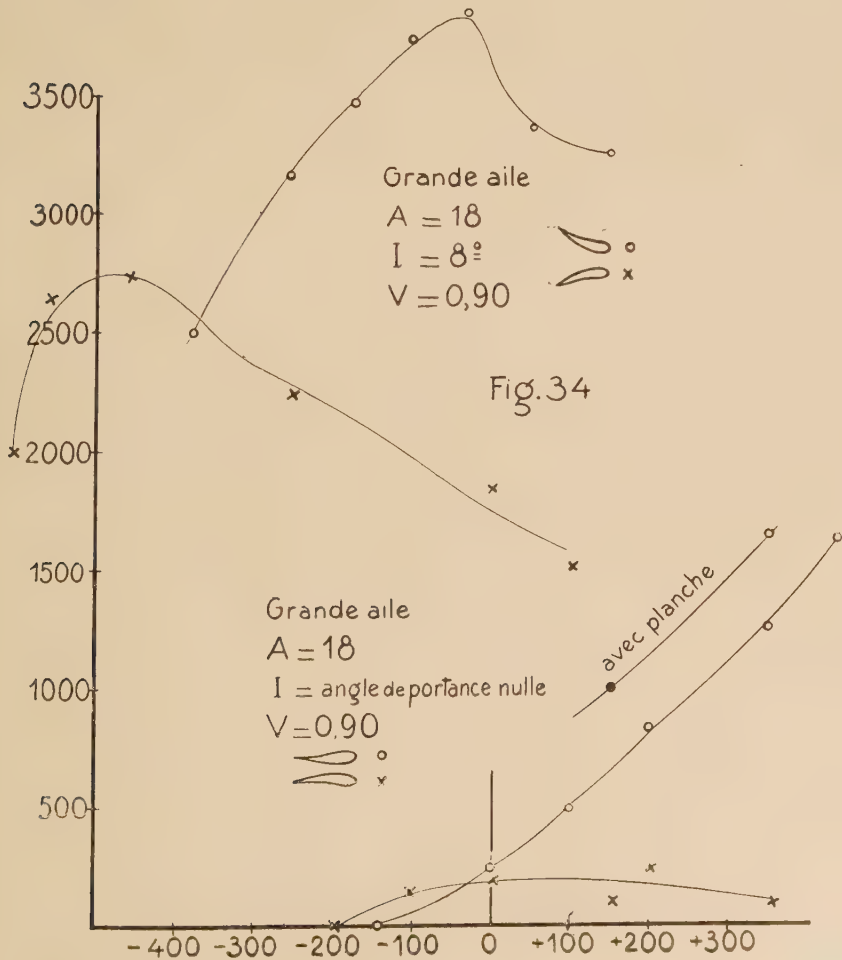
J'ai trouvé ainsi avec la grande aile la courbe du haut de la figure 33 qui en m'étonnant m'amena à reviser ma balance.



*Suite des Polaires avec déflexions vers la surface
et vers le fond*

Les deux polaires du haut de la figure 34, faites avec le plus grand soin ne peuvent que me confirmer que la déflexion vers le bas donne un léger accroissement de R_y suivi ensuite d'une chute.

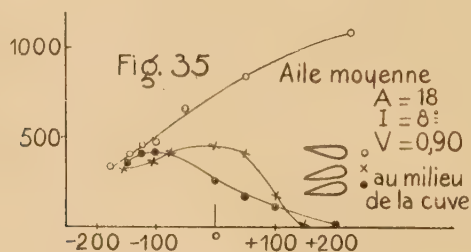
Il était intéressant de voir ce qui se passerait à l'angle de portance nulle et c'est ce que montrent les deux courbes du bas de la figure 34.



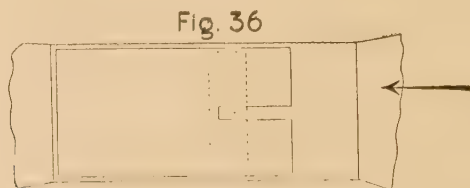
Je ne crois pas surtout après ce dernier essai que l'on ait le droit de penser que la vérité est entre les deux courbes.

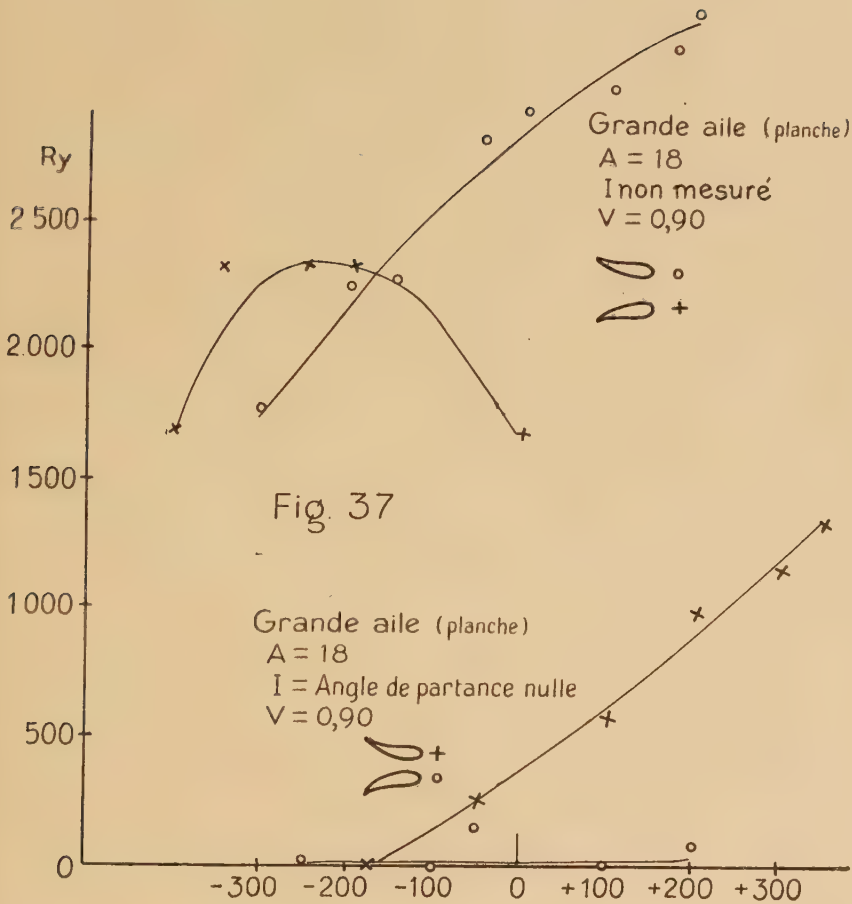
Tentatives diverses et suppression de la veine libre

J'ai essayé d'allonger la tige qui porte l'aile de façon qu'elle soit au milieu de la cuve et non au quart depuis la surface, c'est ainsi que j'ai tracé l'une des courbes de la figure 35, les autres étant au quart comme précédemment.



Puis j'ai essayé de supprimer la surface libre de l'eau, mais devant la difficulté je ne l'ai fait que partiellement comme représenté en plan à la figure 36.

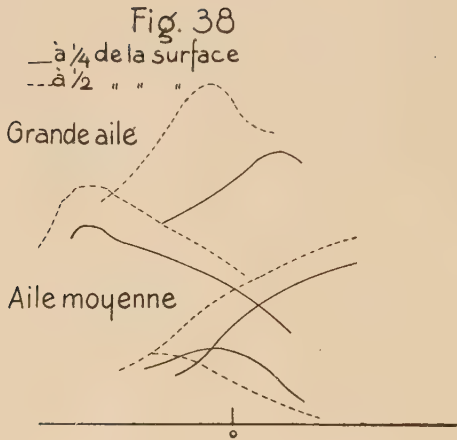




Les courbes de la figure 37 ont été faites dans ces conditions (voir aussi le tracé avec planche figure 34).

On voit qu'aussi bien avec une incidence qu'à l'angle de portance nulle rien n'est changé.

Ayant remarqué qu'aux faibles vitesses la loi de mouvement cessait d'être sinusoïdale à cause du poids de l'aile et de son support, j'ai soutenu ce poids par un élastique.



J'ai dans le même but de régularisation du mouvement ajouté un volant important.

Le changement de sens de l'incidence et la distance à la surface ont toujours eu la même influence que j'ai réunie dans les courbes de la figure 38.

Et dans ces conditions je n'ai pas continué cette méthode de tracé des polaires.

Mais je prie de se reporter page 57 pour voir aux essais d'hélices qu'il s'agit manifestement de l'influence du bassin opératoire, soit du fond, soit de la surface, ou des deux.

HYPERSUSTENTATION DANS L'AIR

Il était donc important de vérifier l'hypersustentation dans l'air.

Dans ce but, j'ai repris l'aile de la figure 1 dans son montage de la figure 3, mais j'ai remplacé les balourds intérieurs par des balourds extérieurs plus importants de façon à pouvoir obtenir une amplitude de battement de 20 mm. L'ensemble fut porté à l'extrémité de la grande soufflerie de Saint-Cyr.

L'incidence étant 18° , l'aile immobile portant 1100 grammes
à la vitesse de 700 tours/minute, elle portait 1250 grammes
puis l'ayant réglée à nouveau sans battement = 1150 grammes
et à la vitesse de 780 tours/minute = 1350 grammes

175

l'accroissement moyen est de $\frac{\quad}{1125} = 15,5 \%$



PRECISIONS DIVERSES

Les vacances de l'Institut de Saint-Cyr et un long voyage aux Etats-Unis et au Canada interrompirent mes expériences.

Fig. 39

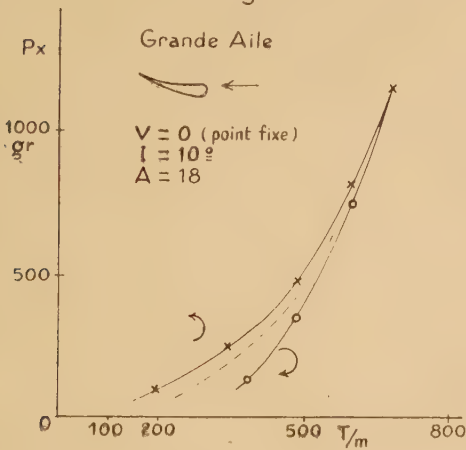
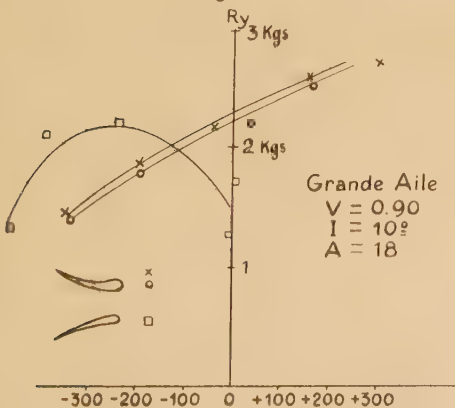


Fig. 40.



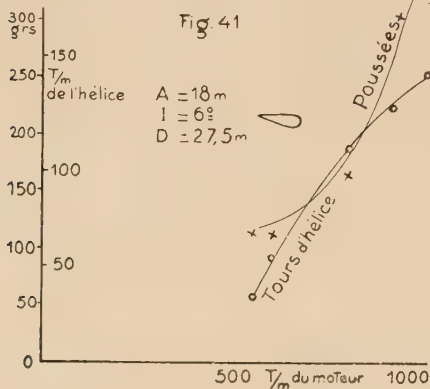
Au retour, je voulus être sûr que le sens de rotation qui m'avait paru influencer légèrement sur la loi de mouvement n'avait pas d'action sur les courbes, et j'ai tracé d'abord les courbes de la figure 39, qui donnent au point fixe P_x en fonction de la vitesse et pour les deux sens de rotation. Ces courbes sont tout à fait analogues à ce que l'on a déjà eu.

Avec un courant d'eau de 0,90 mètres/seconde, j'ai eu les polaires de la figure 40, sur lesquelles il n'y a rien de spécial à noter.

NOUVEAUX ESSAIS D'HELICE BATTANTE

Ces essais furent repris avec l'hélice représentée figure 10

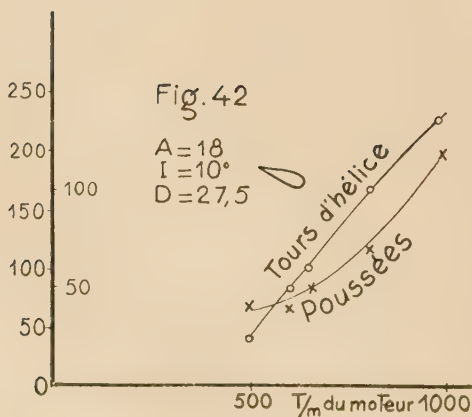
Poussées
Verticales



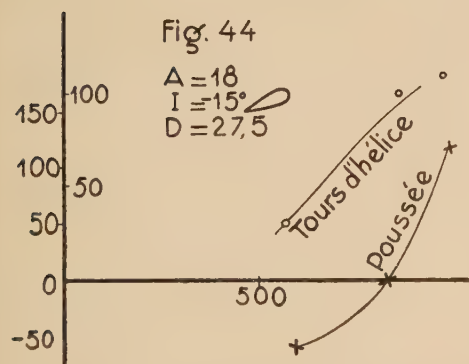
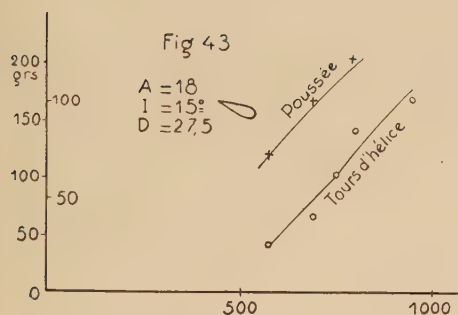
et photos 9, le diamètre étant 275 mm.

J'ai représenté, sur les figures 41, 42, 43 et 44, les vitesses de rotation de l'hélice et les poussées verticales en fonction de la vitesse du battement.

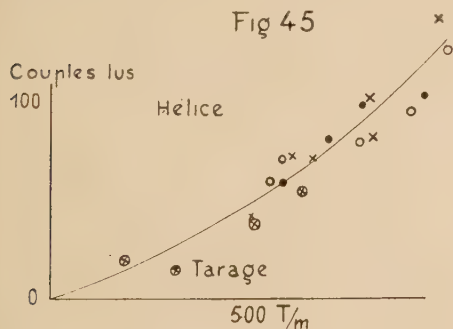
On voit que les deux vitesses sont à peu près une fonction linéaire l'une de l'autre, et que les poussées croissent plus rapidement. On notera les hautes poussées obtenues à l'incidence 6° .



Mais j'attire particulièrement l'attention sur les différences existant entre les figures 43 et 44, faites à la même incidence, mais à la figure 43, l'eau est défléchie vers la surface, et à la figure 44, vers le fond.



Sur la figure 45, j'ai porté les couples lus en fonction des tours/minute du moteur, et il est remarquable que pour les trois incidences essayées ils s'inscrivent sur la même courbe.



Les vitesses de rotation ne sont pas changées mais les poussées sont tellement réduites que même au début elles sont inversées.

Le phénomène est tout à fait analogue à celui remarqué sur les ailes seules et la soufflerie hydrodynamique, tout au moins à veine libre, amène évidemment une très grande perturbation dans les essais, mais il est intéressant de noter que cette perturbation paraît affecter surtout les mesures avec déflexion vers le bas.

Je prie d'examiner la figure 44 en corrélation avec ma remarque fin de la page 52.

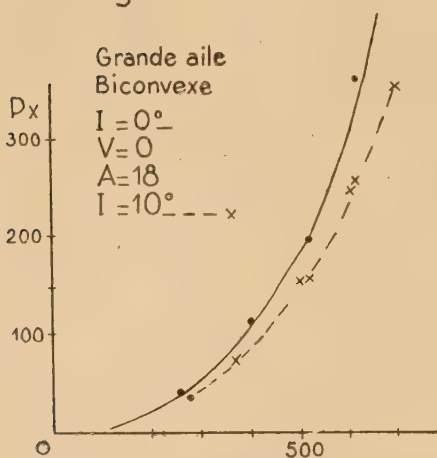
Comme les courbes de vitesse de rotation de l'hélice sont également presque semblables, il s'ensuit que la puissance dépensée dépend peu de l'incidence.

Je discuterai plus loin quelques chiffres se rapportant aux essais d'hélice.

VITESSE DE TRANSLATION DE L'AILE BATTANTE

J'ai commencé par retracer avec soin une courbe donnant P_x au point fixe en fonction de la vitesse du battement pour

Fig. 46



$$A = 18 \text{ et } I = 0$$

courbe représentée en trait plein à la figure 46.

Puis j'ai mis en marche la soufflerie et j'ai constaté que sans battement :

à $V = 0,56$ m/sec.,	la traînée Aile + tige =	40 grammes
à $V = 0,90$ —	— — — — —	= 150 grammes
à $V = 1,30$ —	— — — — —	= 300 grammes

Puis, j'ai cherché la vitesse de battement qui annule la traînée Aile + tige.

à $V = 0,56$ il faut 230 t/m. soit une poussée au point fixe de 40 gr.

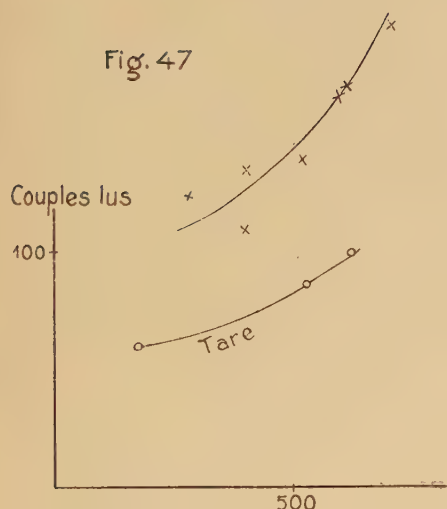
à $V = 0,90$ il faut 435 t/m. soit une poussée au point fixe de 150 gr.

à $V = 1,30$ il faut 620 t/m. soit une poussée au point fixe de 300 gr.

Il semble donc que dans la limite de mes expériences la poussée soit indépendante de la vitesse de translation et que la mesure de la poussée au point fixe permet de calculer la vitesse de translation que cette poussée permet d'atteindre.

Pour apprécier l'influence de l'incidence sur ce résultat j'ai tracé la courbe en pointillé de la figure 46 qui donne la poussée au point fixe à l'incidence 10° .

Fig. 47



J'ai voulu également vérifier les puissances et la figure 47 donne les éléments de ce calcul

On vérifie qu'à 400 t/m. la poussée est de :

32 gr. par 1/1000 de cheval.

23 gr. par 1/1000 de

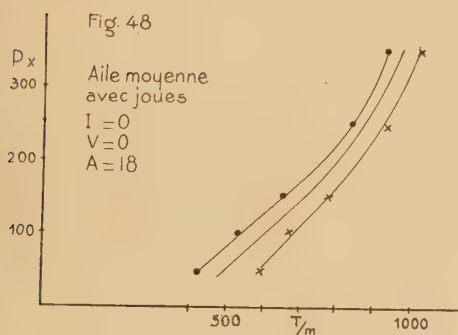
A 600 t/min. :

cheval et on a sensiblement :

$$\frac{32}{23} = \frac{600}{400}$$

J'ai voulu faire les mêmes opérations avec l'aile moyenne

et ai retracé les courbes du P_x de la figure 48 aux deux sens de rotation.



J'ai pu opérer jusqu'à la vitesse d'eau de 1,40 m/sec. pour avoir des chiffres lisibles et j'ai comme plus haut :

à $V = 1,40$ traînée aile + tige = 100 gr.

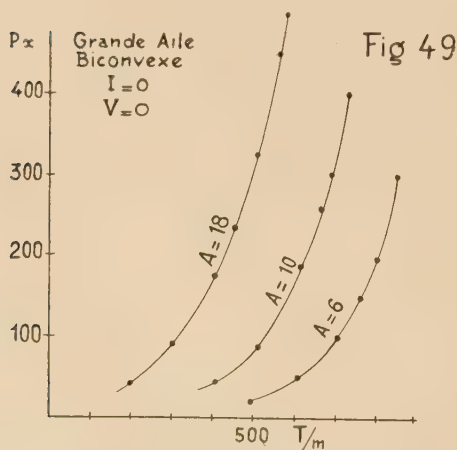
à $V = 1,40$ il faut 550 t/min. soit une poussée au point fixe de 100 gr.

ceci à + ou - 10 grammes.

Un calcul comme plus haut donne une poussée de 25 grammes par 1/1000 de cheval, confirmant en passant que le poids au cheval ne dépend pas de L^2 et que L^2 figure par conséquent de la même façon dans la formule de la poussée et de la puissance.

PUISSANCE CONSOMMEE PAR L'AILE BATTANTE AU POINT FIXE

Il apparait à chaque essai plus clairement que la formule donnant la puissance en fonction de la vitesse et de l'amplitude du battement sera un des principaux résultats de ce travail et si les essais réalisés affirment que cette puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du battement il reste une incertitude sur l'exposant de l'amplitude du battement.

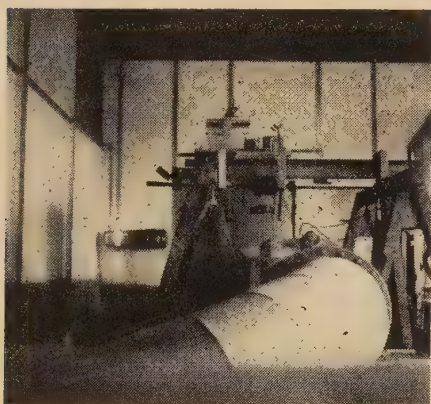


J'ai donc repris une série d'essais aux battements:
 $A, = 18, 10, \text{ et } 6$
 $I. = 0.$
 $V, = 0.$

et j'ai mesuré chaque P_x et le couple.

J'ai eu pour P_x les courbes de la figure 49 qui sont une excellente confirmation de $P_x = f(N^2 A^3)$ mais je n'ai pas reproduit les courbes de puissance qui donnent bien $W = f(N^3)$,

mais l'exposant de A reste incertain entre 2 et 3.



J'ai alors renforcé ma balance pour supprimer les vibrations et augmenté la sensibilité en la calant en tous sens de façon à ne plus

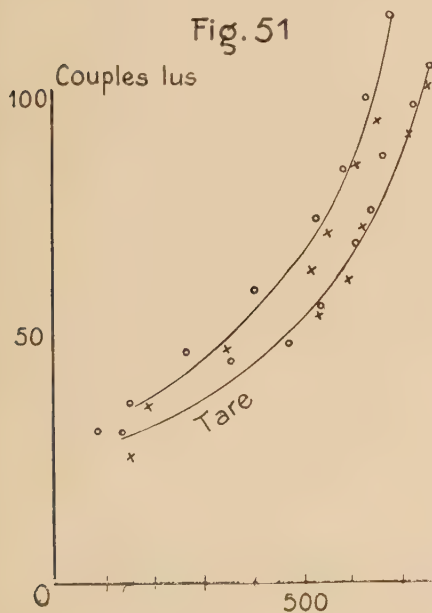
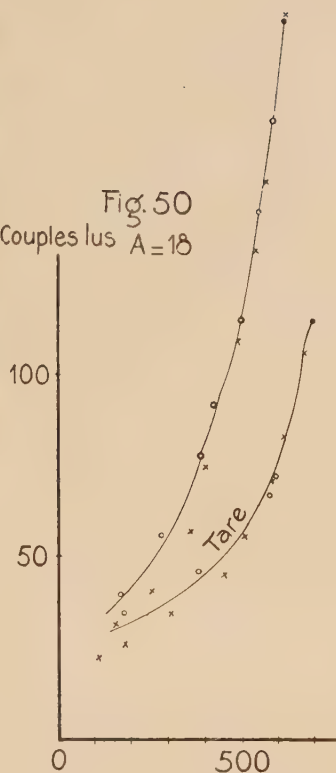


Fig. 50
Couples lus $A=18$



mesurer que les couples et la vitesse.

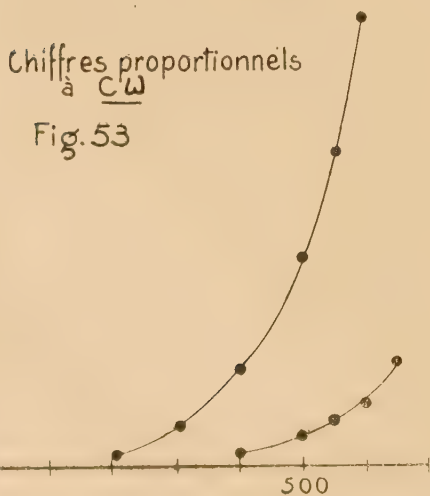
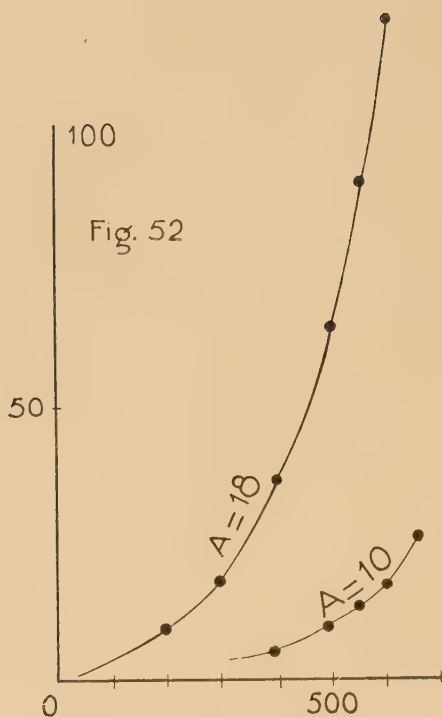
On voit, photo 12, l'aspect définitif de mon installation.

Opérant au battement

$A = 18$,

j'ai, sur la figure 50, les couples lus avec et sans aile.

Sur la figure 51, j'ai au battement $A = 10$ les couples lus avec et sans aile.



Sur la figure 52, j'ai
les couples vrais pour

$A = 18$

et $A = 10$

Sur la figure 53, j'ai
les produits $C\omega$ pour

$A = 18$ et $A = 10$

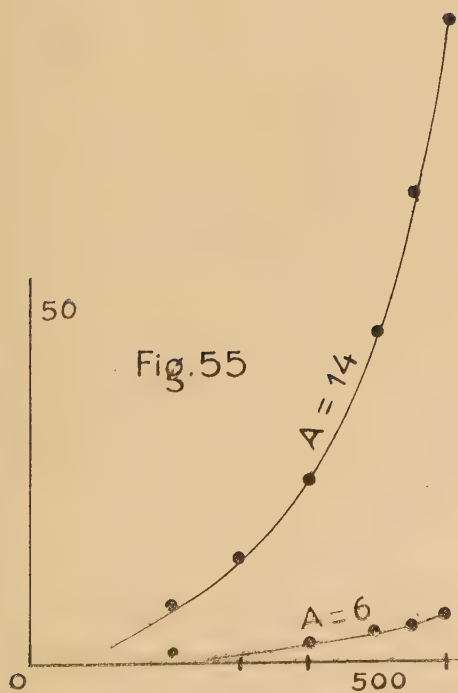
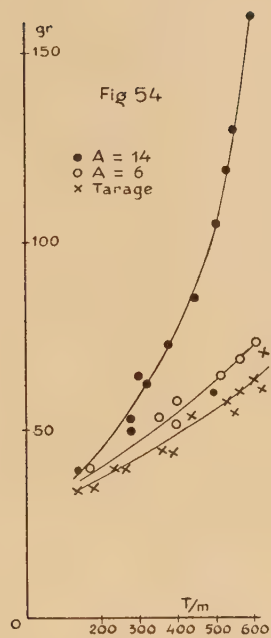
et ces courbes donnent très
exactement

$$W = f(N^3 A^3)$$

Je crois que les diffi-
cultés éprouvées jusque
maintenant venaient de ce
que A n'était jamais tout
à fait correct, les écarts
étant diminués l'exposant
paraissait être entre 2 et 3,
surtout quand plusieurs
mesures étaient faites si-
multanément.

Pour mieux affirmer
cette formule, j'ai refait les
mêmes courbes avec les
battements d'amplitude 14
et 6.

J'ai, sur la figure 54, les couples lus et les tarages.



Sur la figure 55, les couples vrais.

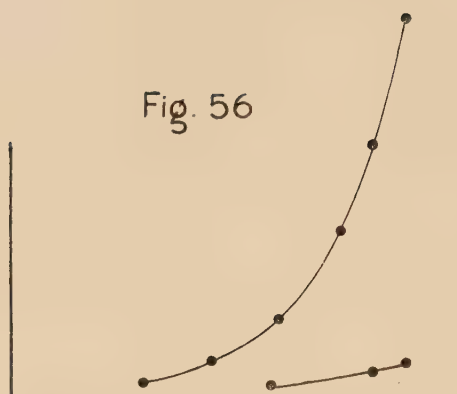


Fig. 56

Sur la figure 56, les produits $C \omega$ pour

$$A = 14 \text{ et } A = 6$$

ces courbes donnent exactement $N = f(N^3 A^3)$.

On voit que les courbes de la figure 53, et celles de la figure 56 sont en parfaite concordance. Il existe toutefois entre elles un léger décalage systématique mais les expériences ayant été faites à trois semaines d'intervalle, je ne puis garantir d'avoir employé la même incidence ou le même niveau de l'eau.

En translation.

La vitesse de translation la plus intéressante est celle où pour une vitesse de battement donnée la poussée s'annule.

J'ai dans ce but fait les mesures ci-dessous :

Vitesse d'eau	Px	T/min.	Couple	A	I
—	—	—	—	—	—
0,65	0	300	90	18	0
0	non lu	300	90	18	0
1,36	0	430	130	18	0
0	non lu	430	120	18	0
1,45	0	450	130	18	0
0	non lu	480	130	18	0

On voit que la puissance dépensée par une même vitesse de battement dépend très peu de la vitesse de translation, il est très

facile de voir durant l'expérience le fléau mesurant les couples presque insensible à des variations de vitesses du courant d'eau.

Le tableau ci-dessous montre qu'il en est de même avec $l = 13^\circ$, mais la puissance consommée est plus grande.

Vitesse d'eau	Px	T/min.	Couple	A	I
—	—	—	—	—	—
0,65	0	470	110	18	13
0	non lu	470	110	18	13
1,25	0	620	210	18	13
0	non lu	620	210	18	13



HELICE BATTANT DANS L'AIR

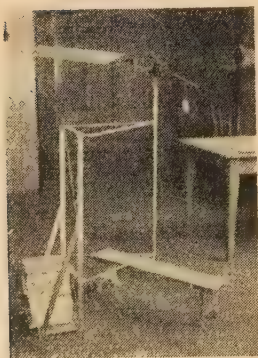
Un des moyens les plus simples de réaliser des essais dans l'air m'a paru être de faire tourner une aile en manège sous la forme d'une pale d'hélice battante dans l'air, à cet effet, je me suis adressé au spécialiste bien connu de modèles réduits, M. Chabonat.

Une aile biconvexe symétrique très légère de 0 m. 60 d'envergure, de 0 m. 12 de corde et 25 millimètres d'épaisseur était portée par un petit bras, au bout duquel un petit moteur électrique d'un millième de cheval équilibrait son poids. La puissance provenait d'une petite pile d'abord, puis d'un petit transformateur de sonnerie. Le moteur par un arbre traversant toute l'aile faisait tourner un petit balourd en plomb.

Aux premiers essais le cercle balayé avait 0 m. 70 de rayon, l'aile pesait 22 gr., le balourd 20 gr. pour un rayon de 4 cm. et tournant à 600 t/m. environ.

Dans ces conditions, la sustentation fut de 30 gr. environ pour une vitesse de rotation de 30 t/minute.

Photo 13



Dans une deuxième série d'expériences avec un cercle balayé de 0 m. 80 de rayon, on obtint 5 tours en 8 secondes, et une sustentation de 45 grammes.

La puissance était, comme prévue, insuffisante, mais les premiers résultats encouragèrent à des frais supplémentaires.

Je refis un montage analogue (voir photo 13), mais avec une aile plus grande, envergure 0 m. 75, corde 0 m. 15, épaisseur 30 mm., également biconvexe symétrique.

Le moteur fut un petit moteur de machine à coudre, le balourd donnant lieu à des vibrations d'environ 10 à 15 mm. d'amplitude, mais à des fréquences de 1500 à 2000 et même parfois plus, mais non mesurées ; le cercle balayé avait un mètre de rayon

Dans ces conditions j'obtins des vitesses de rotation de 40 à 60 tours/minute et des sustentations de 120 à 150 grammes.

Les essais continuent avec des mises au point successives.

ESSAI D'UN PETIT PLANEUR VIBRANT

J'ai fait transformer la première aile biconvexe symétrique de 0 m. 60 d'envergure en un petit planeur à caoutchouc ; après plusieurs essais, le montage le meilleur a paru être celui où l'hélice, s'il y en avait une, aurait été à l'arrière de l'aile, l'empennage maintenu à sa place arrière par deux rotins.

L'hélice étant remplacée par un petit balourd, comme dans les essais ci-dessus, le petit planeur, qui descend normalement suivant une pente de $\frac{1}{5}$ environ, fait des parcours horizontaux quand le balourd tourne.

Il est assez saisissant de voir voler un avion dont l'hélice est remplacée par une tige d'acier de 3 mm. de diamètre portant à 4 cm. de son axe une masse de plomb de 15 grammes.

Là aussi les essais continuent.

CONCLUSION ACTUELLE

Limites.

Il doit être d'abord bien entendu que les conclusions ci-dessous s'appliquent dans les limites de mes expériences sans qu'il soit interdit pourtant de penser qu'elles puissent s'extrapoler largement.

Ces limites sont les suivantes :

1° La plupart des essais furent faits dans l'eau, mais ceci ne paraît pas présenter d'inconvénients, parce que :

- a) plusieurs contrôles dans l'air concordent ;
- b) les mesures sont plus faciles, les forces mesurées allant de 50 gr. à 2 kilos, avec des précisions de ± 5 gr. à ± 10 gr., c'est-à-dire de 1/10 dans les plus mauvais cas à 1/100 dans les meilleurs.

2° Dimensionés des ailes variant en surface de 1 à 16.

3° Amplitude des battements de 1/10 à 10 fois l'épaisseur de l'aile.

4° Vitesse du battement de 1 à 25 par seconde.

5° Battement à peu près orthogonal et suivant une loi sensiblement sinusoïdale.

6° Limites analogues en voilure tournante (hélice).

7° Le rapport de l'envergure à la corde fut toujours voisin de 4, de sorte que L^2 dans mes formules est plutôt caractéristique d'une surface.

AUTOPROPULSION DE L'AILE BATTANTE

C'est dans ces conditions que j'ai trouvé les deux formules :

$$P_x = \alpha N^2 A^3 L^2$$

$$W = \beta N^3 A^3 L^2$$

dans lesquelles nous avons :

P_x est la poussée au point fixe en kgs.

N le nombre de battements à la minute.

L^2 la surface de l'aile en mètre carré (voir plus haut).

W la puissance en chevaux.

Dans ces conditions mes expériences permettent de proposer :

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{1}{10} \\ \beta = \frac{4}{10000} \end{array} \right\} \text{ dans l'eau}$$

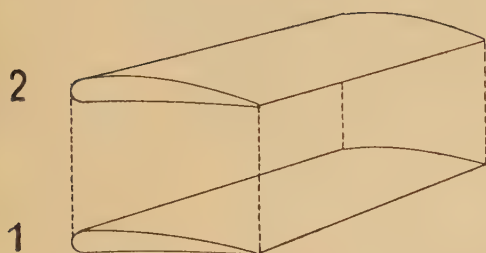
Je puis affirmer que toute aile présentant une dissymétrie le long de son profil, par exemple, grosse à l'avant et pointue à l'arrière, est auto propulsive, en battant orthogonalement d'un mouvement quelconque.

On notera que N et A ont la même importance dans le battement au point de vue propulsif.

Au point de vue de la résistance des matériaux, il faut se rappeler qu'à cause des forces d'inertie, N est à la puissance 2 et A à la puissance 1.

Les deux formules fondamentales ci-dessus correspondent à une explication que je me donnais à priori.

Fig 57



Si l'on considère une aile qui bat comme ci-contre, figure 57, de la position 1 à la position 2, la poussée P_x sera proportionnelle à la quantité de mouvement imprimée à une certaine masse d'air vers l'arrière : $m V$.

Cette masse d'air est apparemment proportionnelle à la masse d'air incluse entre les positions 1 et 2, c'est-à-dire à $A L^2$.

La vitesse imprimée à cette masse d'air est apparemment proportionnelle à la vitesse moyenne du battement, c'est-à-dire à $N A$ et la quantité de mouvement imprimée dans l'unité de temps sera proportionnelle à

$$N \cdot N A \cdot A L^2 \text{ c'est-à-dire } N^2 A^2 L^2$$

La puissance étant de la forme $1/2 m \cdot V^2$ sera donc proportionnelle à $N A \cdot N^2 A^2 L^2$ c'est-à-dire $N^3 A^3 L^2$

Les deux formules ci-dessous sont analogues à celles de l'hélice au point fixe, on a :

$$P_x = \alpha N^2 A^2 L^2, \text{ pour l'hélice : } P_x = \alpha N^2 D^4$$

$$W = \beta N^3 A^3 L^2, \text{ pour l'hélice : } W = \beta N^3 D^5$$

On voit que le poids au cheval n'est pas caractéristique.

Nous pourrions écrire, comme l'a fait M. Margoulis :

$$K_f = \frac{\alpha}{\beta \frac{2}{3}}$$

$$\text{et il vient } P_x = K_f \sqrt{W^2 L^2}$$

et je pourrai appeler k' la qualité propulsive d'une aile donnée.

La différence avec l'hélice paraît être dans ce que la dimension de la pale battante compte seule et non l'air balayée. Mais il faut se rappeler que dans les limites de mes expériences, A , sans être une fonction de L , est contenu dans des limites.

La force propulsive paraît diminuer quand l'aile se déplace dans le fluide, mais on trouve que la poussée au point fixe est sensiblement égale à la résistance de l'aile se déplaçant dans le fluide

à la vitesse qui donne une poussée nulle.

C'est là un phénomène très différent de la combinaison aile hélice et il semble pouvoir permettre de calculer la vitesse que peut atteindre une aile battante à une fréquence et à une amplitude donnée.

La force propulsive due à l'aile battante varie peu pour de petites incidences.

Elle est sensiblement dans le plan de l'aile, de sorte que pour de petites incidences, il y a une composante de sustentation même au point fixe.

Je tiens à noter que tous les essais de poussées sont très concordants.

HYPER-SUSTENTATION DE L'AILE BATTANTE

L'aile battante pour une incidence donnée a un C_z toujours meilleur que celui d'une aile non battante.

Cet accroissement est beaucoup plus important pour l'aile d'envergure finie et peut atteindre plusieurs fois la valeur habituelle.

Son maximum se situe souvent vers le point où la vitesse de translation annule la poussée, c'est-à-dire vers la position d'équilibre du vol.

Les polaires $C_z = f(C_x)$ d'une aile creuse et d'une biconvexe se superposent, mais l'aile creuse (Joukowski) demande moins de puissance.

Quand l'aile a une incidence, nous avons vu que son autopropulsion diminue peu, mais sa résistance augmentant la vitesse de translation qui annule la poussée est plus petite qu'avec l'incidence nulle.

La puissance à une vitesse de battement est à peu près indépendante de la vitesse de translation et ceci quelle que soit l'incidence.

De sorte que l'on peut non seulement apprécier à quelle vitesse pourra se déplacer une aile battante, mais aussi la puissance nécessaire par une mesure au point fixe.

L'incidence peut être très élevée (30°).

RENDEMENT

Mes expériences ne me permettent pas d'affirmer des comparaisons de rendement de l'aile battante avec d'autres systèmes tels que par exemple l'aile remorquée par une hélice. Des comparaisons faites sur cette base ne sont pas mauvaises, mais les puissances de l'ordre de quelques millièmes de chevaux peuvent bien être comparées entre elles sur des courbes mais ne peuvent servir de comparaison avec des chiffres connus d'autres systèmes.

HELICE BÂTTANTE

Les caractéristiques de l'aile battante se maintiennent dans le cas où elle tourne à la manière d'une pale d'hélice.

Cette façon de faire tourner une hélice montre, figure 45, page 57, que la qualité sustentatrice est comparable à celle d'une hélice entraîné par un couple appliqué sur son axe de rotation, mais en l'absence de ce couple l'emploi d'une seule hélice sustentatrice devient possible. C'est là un développement qui méritera une étude particulière.

Une difficulté semble être actuellement d'absorber une puissance suffisante dans une pale relativement petite (la dimension joue en $A^3 L^2$, car A dépendant toujours un peu de L , on peut dire que la dimension joue à la puissance 4), à moins d'avoir des fréquences de battement élevées et peut-être plus élevées que dans mes essais actuels.

Les meilleurs rendements sont à des incidences faibles, mais la rotation existe pour des incidences très élevées (40°).

Des essais d'hélices battantes dans l'air sont absolument concondants.

VOL DES OISEAUX

Cette étude montre que l'aile des oiseaux est autopropulsive et de plus hypersustentatrice.

Elle montre donc que l'on commet des erreurs en étudiant le vol des oiseaux au moyen d'essais en soufflerie sur une aile immobile.

R E S U M E

Une aile battante est toujours autopropulsive pourvu qu'il existe une dissymétrie entre le bord d'attaque et le bord de fuite, par exemple :

- A) Avec un battement orthogonal le bord de fuite est pointu et le bord d'attaque épais.
- B) Avec un battement orthogonal le bord de fuite est flexible et le bord d'attaque rigide (oiseaux).
- C) L'amplitude du battement du bord de fuite est plus grand que celle du bord d'attaque (éventail).

Plusieurs de ces moyens peuvent coexister.

J'ai étudié A, plus facile à réaliser que B et qui a probablement un meilleur rendement que C, tout au moins si dans ce cas les battements dépassaient plusieurs degrés, plaçant à chaque fin de course l'aile en travers du vent.

Le procédé A semble également adapté aux battements rapides et de faibles amplitudes.

J'ai donné dans ce cas les principales lois concernant la poussée au point fixe et en translation et je crois avoir mesuré, pour la première fois, des C_x négatifs.

J'ai trouvé des hypersustentations fort importantes.

J'ai fait tourner une hélice et voler un petit planeur par la seule action d'un balourd produisant une vibration.

L'aile battante autopropulsive et hypersustentatrice. — Note de M. René Moineau (séance du 20 mars 1939) présentée par M. Henri Villat.

J'ai entrepris l'étude de l'aile battante expérimentalement pour avoir quelques chiffres sur le fonctionnement d'une telle aile, notamment à des fréquences élevées (de 1 à 25 à la seconde), et pour des amplitudes de battements faibles ne dépassant pas 10 fois l'épaisseur de l'aile, le battement étant à peu près orthogonal, à plat et suivant une loi sinusoïdale.

Dans ces conditions, pourvu que l'aile soit dissymétrique dans le sens du profil, par exemple, épaisse à l'avant et pointue à l'arrière, on constate que l'aile est *autopropulsive* et *hypersustentatrice*.

Je reproduis (voir figure 4, page 18) un mécanisme ayant servi à faire de nombreuses expériences en faisant battre des ailes dans l'eau.

La figure (voir figure 12, page 31) donne les poussées au point fixe obtenues à incidence nulle en fonction de la fréquence des battements pour diverses amplitudes du battement, et pour une aile biconvexe symétrique de $0^{\text{m}^2}, 04$

Appelant N la fréquence du battement, A l'amplitude du battement, L la dimension de l'aile, Px la poussée au point fixe, W la puissance employée, j'ai trouvé $Px = \alpha N^2 A^2 L^2$ et $W = \beta N^3 A^3 L^2$ formules analogues à celles des hélices, d'où l'on tire également

$$Px = Kf \sqrt[3]{W^2 L^2}$$

La figure (voir figure 25, page 44) donne les sustentations obtenues avec une aile biconvexe symétrique de $0^{\text{m}^2}, 01$, en employant le même mécanisme dans un courant d'eau de 0.90 m/sec. avec une incidence de 15° .

J'ai fait aussi quelques essais d'aile battante tournante sous la forme d'une hélice battante ayant l'avantage de ne pas donner de couple de réaction sur son axe.

Il convient de noter que ces expériences montrent que l'aile battante de l'oiseau est autopropulsive et hypersustentatrice.

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. 208, p. 964, séance du 27 mars 1939.)

BIBLIOGRAPHIE

- Borelli *De motu animalium*. 1680 - 1685 - 1710.
- Dubochet *Recherches sur le vol des oiseaux et l'art aéronautique*. 1834.
- D'Argil. *L'aéronaute*. 1868.
- Muller H. *Comptes rendus*. T. C. p. 1317.
- Mouillard. *L'Empire de l'Air*. 1881.
- Marey. *La machine animale*. 1886.
- Pettigrew. -
J. Bell. *La locomotion chez les animaux*. 1887.
- Marey. *Le vol des oiseaux*. 1890.
- Eteve. *Génie civil*, 7 et 14 août 1909.
Technique aéronautique. 1910, page 241.
- Desmons R. *Vol des oiseaux*. 1910.
- Armengaud
(jeune) *Le problème de l'aviation*.
- Alexandre Sée. *Les lois expérimentales de l'aviation*.
- Painlevé et
Emile Borel. *L'aviation*. 1910.
- OEmichen. *Nos maîtres les oiseaux*.
Etude sur le vol animal et la récupération de l'énergie dans les fluides. 1920.
- Prandtl. *Göttingen nachrichten*. 1919.
- Birnbaum. *Das ebene problem des schlagenden Flügels*.
Zamm 1924.

- Breguet Louis. *Comptes rendus*. 30 juin 1924.
- Breguet Louis. *Le vol à voile dynamique des oiseaux* 1925.
- Alayrac. *Bulletin technique du Service Technique de l'Aéronautique*, n° 39. Décembre 1926.
- Boel Maurice. *Le vol du pigeon*. 1926.
- Magnan A. et A. Sainte-Lagüë. *Le vol au point fixe*. 1933.
- Kahn Louis. *La propulsion animale dans les fluides*. 1929.
- Katzmayr (Richard von).
- Budig. *L'Aéronautique*. Août 1938.
- Cicala P. *Aérotecnica*. Août., Sept., Nov. 1936, Mai 1937, Avril 1938.
- Egloff R. *Flugsport*. 22 Déc. 1937 et 5 Janv. 1938.
- Magnan A. *Comptes rendus*. 7 Février 1938.
- Denis. *Comptes rendus*. 21 Février 1938.
- Giovanni Serragli. « *L'aérodinamica del volo muscolare umano*. ». *Aérotecnica* Novembre 1938.
- Moineau R. *Comptes rendus*. 20 Mars 1939.



DEUXIEME THESE

UN NOUVEAU CAPSULISME

Vu et approuvé :

Paris, le 2 Juin 1939

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Ch. MAURAIN

Vu

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

G. ROUSSY.

UN NOUVEAU CAPSULISME

UN NOUVEAU CAPSULISME

Au moment de donner un titre à cette note qui a trait à un nouveau mécanisme rotatif destiné à créer ou utiliser des variations de pression d'un fluide, je n'ai pas trouvé de mot français dans les dictionnaires.

Pourtant un ouvrage de cinématique (paru en 1877) de M. F. Reuleaux, Directeur de l'Académie Industrielle de Berlin, et traduit par A. Debize, emploie couramment le mot « Capsulisme » pour ces sortes de mécanismes.

Je n'ai pas, à vrai dire, trouvé dans ce livre une définition générale du mot « capsulisme », mais des définitions particulières telles que celles des capsulismes à manivelles et des capsulismes à roues.

Ces mécanismes sont pourtant toujours définis comme devant se composer de plusieurs organes qui, par leurs positions relatives, engendrent un ou plusieurs vases ou capsules, et qui, par leurs déplacements relatifs, font varier et/ou déplacent ces capsules de façon à laisser tantôt entrer, tantôt sortir un fluide.

Ce mot « capsulisme » est déjà employé pour la commodité de langage par beaucoup de mécaniciens, et je désignerai donc sous le nom de Capsulisme R. Moineau ou R. M., le nouveau mécanisme étudié dans cette thèse.

Un petit nombre d'auteurs se sont occupés des capsulismes; ce sont, en général, des auteurs qui étudient des pompes ou des machines thermiques et qui consacrent un ou plusieurs chapitres aux capsulismes en les appelant souvent pompes rotatives ou machines rotatives.

L'ouvrage le plus important, et traitant spécialement des capsulismes, est précisément la *Cinématique*, de M. F. Reuleaux (Librairie Savy, 1877), où sont décrits et classés tous les mécanismes de ce genre conçus, et même concevables, dit M. Reuleaux, qui ne croit guère que l'on puisse ajouter à sa liste. Il en fait l'étude, d'ailleurs, uniquement au point de vue cinématique sans s'occuper des fluides qui les traverseront lorsqu'on les utilisera comme pompes compresseurs ou moteurs.

M. L. Poillon, Ingénieur des Arts et Manufactures, a fait paraître, chez E. Bernard et C^e, à Paris, en 1885, un *Traité des pompes et machines à élever les eaux* qui est un copieux traité accompagné d'un excellent atlas de planches où sont décrites toutes les pompes en usage à l'époque avec une part importante consacrée aux pompes dites rotatives et, par conséquent, à de nombreux capsulismes dont quelques-uns sont périodiquement réinventés. M. L. Poillon essaye, de plus, d'étudier le fonctionnement de ces machines et, malgré leur variété, de les relier par des lois de fonctionnement communes.

Par ordre chronologique, je dois placer ici un curieux petit livre de Henry T. Brown, *Mouvements Mécaniques*, traduit de l'anglais et publié en 1890 par Henri Stevart. Ce petit livre donne une image accompagnée de quelques lignes sur de nombreux mécanismes, parmi lesquels quelques capsulismes.

M. A. Witz a écrit de nombreux livres sur les machines thermiques, parmi lesquels je mentionnerai, pour sa bibliographie très complète, *Les machines thermiques* et, en 1891, *La machine à vapeur* où une place est faite à plusieurs capsulismes utilisés comme moteurs.

M. R. Masse, Ingénieur civil des Mines, a publié chez Dunod, en 1903, un traité, *Les pompes*, traité bien classique à son époque, à la fois théorique et pratique, et il consacre un chapitre aux capsulismes.

M. A. Berthier a publié chez H. Desforges, en 1908, *Les nouvelles machines thermiques* et les premiers chapitres sont consacrés aux moteurs rotatifs à vapeur et aux moteurs rotatifs à pétrole. M. Berthier analyse les avantages et les défauts d'un certain nombre de ces capsulismes.

Le maître ouvrage actuel sur les pompes est certainement celui de M. Louis Bergeron, publié chez Dunod, en 1928, sous le titre *Machines hydrauliques*.

M. Bergeron consacre un grand chapitre aux pompes rotatives, en décrivant quelques-unes dont il fait une étude sommaire du genre de celle développée dans ce qui suit. Il note que ces machines ont souvent un réel intérêt et que leur domaine est assez vaste pour justifier les efforts des inventeurs.

M. René Champly a fait paraître, en 1931, à la Librairie Polytechnique Ch. Béranger, sous le titre *Pompes et élévateurs de liquides*, une petite brochure qui décrit quelques capsulismes modernes.

Je pense que les deux plus importants ouvrages sur les pompes pour liquides ou gaz, au point de vue historique et descriptif, ont été publiés par le Science Museum de Londres.

Ils ont tous deux pour titre *Pumping Machinery*.

Le premier, *Historical notes*, daté de 1932, commence à l'ancienne Egypte pour finir par les plus modernes pompes à vide.

Le deuxième, *Descriptive catalogue*, daté de 1934, décrit suffisamment chacune des 526 machines exposées au Science Museum dans la classe des pompes.

Aux livres que je viens de citer, j'ajouterai la *Technique moderne* du 1^{er} mai 1934 et, naturellement, les *Bulletins officiels de la propriété industrielle*, tant en France qu'à l'étranger.

Au début de mes travaux, je me suis posé le problème de réaliser mécaniquement un mouvement analogue aux mouvements *péristaltiques* des êtres organisés. Je voulais pour cela trouver un capsulisme qui ne comporte que deux pièces simples, animées d'un mouvement relatif de rotation.

Mon but était que ce capsulisme puisse être employé comme pompes, compresseurs ou moteurs, et qu'il puisse être construit en matériaux les plus divers, tels que métaux, caoutchouc, matériaux réfractaires, etc...

J'ai pu réaliser un tel capsulisme et, bien qu'il n'ait pas encore été utilisé de toutes les façons dont il pourrait l'être, il a déjà permis la création d'industries intéressantes dans plusieurs pays et j'ai essayé de réunir ci-dessous les principaux problèmes qui ont été à résoudre, classés en trois chapitres :

Description. — Fonctionnement. — Usage.



DESCRIPTION

THEORIQUE

Un capsulisme R. Moineau est composé essentiellement :

- a) De deux engrenages hélicoïdaux intérieurs l'un à l'autre;
- b) L'élément externe ayant une dent de plus que l'élément interne;
- c) Chaque dent étant dans chaque section transversale en contact avec l'autre élément;
- d) Les pas des hélices des deux éléments sont dans le rapport du nombre des dents.

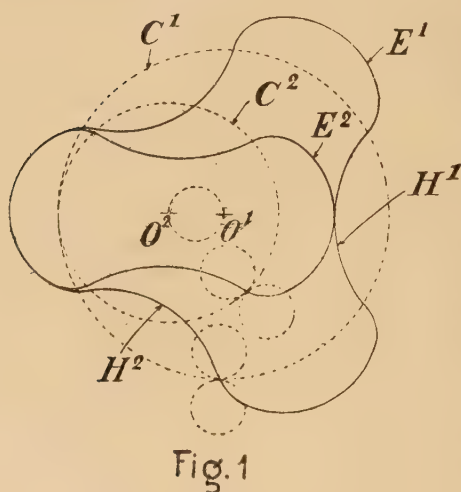
Deux conditions sont donc nécessaires :

1° Trouver deux dentures intérieures l'une à l'autre différant d'une dent et dont chaque dent d'un élément soit toujours en contact avec l'autre élément;

2° Empiler les sections ainsi trouvées de façon à créer deux engrenages hélicoïdaux.

PREMIERE CONDITION

On connaît une première famille de profils dans laquelle chacun des profils est formé de courbes épicycloïdales et hypocycloïdales engendrées sur le cercle primitif correspondant par des cercles générateurs dont le diamètre est égal à l'excentricité des cercles primitifs. Tous les nombres de dents peuvent être employés depuis le profil interne à une dent.



La fig. 1 représente deux profils utilisables. Le profil externe a trois dents, le profil interne a deux dents. Les cercles primitifs C^1 et C^2 tangents intérieurement l'un à l'autre ont leurs centres en O^1 et O^2 , leurs rayons sont dans le rapport $3/2$, l'excentricité $O^1 O^2$ est égale au tiers du grand rayon C^1 et à la moitié du petit rayon C^2 .

Les cercles générateurs des épicycloïdes E^1 , E^2 et des hypocycloïdes H^1 , H^2 , roulent sur et dans les cercles primitifs C^1 et C^2 et tous ont un diamètre égal à l'excentricité $O^1 O^2$.

Une deuxième famille de courbes peut être établie comme suit : Chacun des profils externe ou interne est formé de courbes hypocycloïdales engendrées dans le cercle primitif correspondant par des cercles générateurs dont le rayon est égal à l'excentricité des cercles primitifs.

La fig. 2 représente une famille de profils dont chacun peut être le profil externe de celui qui a une dent de moins, et le profil interne de celui qui a une dent de plus. On voit sur la fig. 2 les quatre cercles primitifs C^1 , C^2 , C^3 , C^4 , de profils à quatre, trois, deux et une dents, ayant respectivement leurs centres en O^1 , O^2 , O^3 , O^4 et dont les rayons décroissent dans le rapport des nombres de dents.

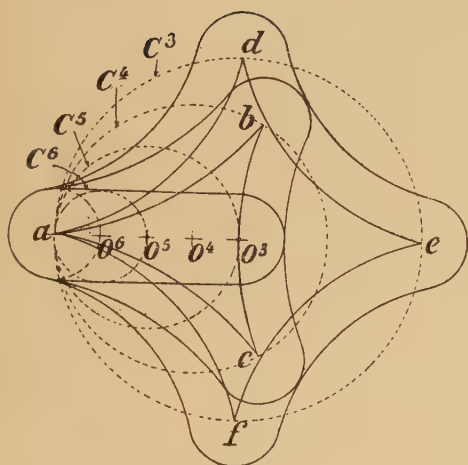


Fig. 2

des par des développantes de cercles. Une quatrième famille de profils pourrait être constituée en remplaçant les hypocycloïdes par des épicycloïdes.

Les troisième et quatrième familles sont moins intéressantes que les deux premières et n'ont pas été employées car elles donnent des angles aigus au raccordement des courbes.

Ces profils peuvent être remplacés par les enveloppes extérieures de cercles de même rayon pour les profils externes et internes roulant sur les profils sus-énoncés. Sur la fig. 2 ces enveloppes sont obtenues à l'aide de cercles ayant un diamètre égal à l'excentricité $O^3 O^4$, $O^4 O^5$, mais ce diamètre peut être quelconque.

Par ces enveloppes, la dent unique devient un cercle de centre a tournant autour de O^6 .

L'engrenage à deux dents devient un profil symétrique tournant autour de O^5 , etc...

On remarquera que dans chaque famille de profils, il existe un profil à une et deux dents et notamment la deuxième famille permet d'obtenir une denture intérieure qui a pour section un cercle et une denture extérieure qui a pour section une rainure composée de deux demi-cercles réunis par deux lignes droites dont la longueur est égale à $4 E$.

Les hypocycloïdes sont tracées avec des cercles générateurs dont le rayon est égal à l'excentricité commune $O^3 O^4$, $O^4 O^5$, $O^5 O^6$. Les courbes obtenues sont :

Pour le profil à quatre dents, la courbe $adef$,

Pour le profil à trois dents, la courbe abc ;

Pour le profil à deux dents, la droite $a O^3$;

Pour le profil à une dent, le point a .

Une troisième famille de profils pourrait être constituée comme la deuxième en remplaçant les hypocycloïdes

DEUXIEME CONDITION

Ce sont ces profils ou leurs variantes qui sont empilés en hélice, en respectant la troisième condition relative aux pas des hélices, ces pas devant être dans le rapport du nombre de filets ou dents.

Dans la fig. 3, on a utilisé les courbes enveloppes déduites des hypocycloïdes de la fig. 2.

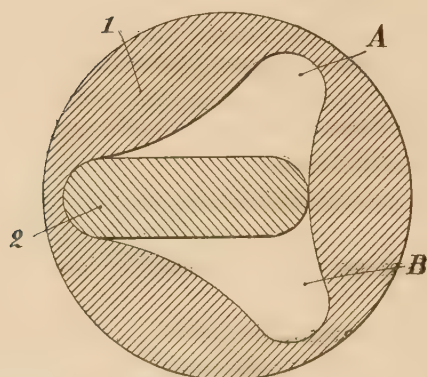
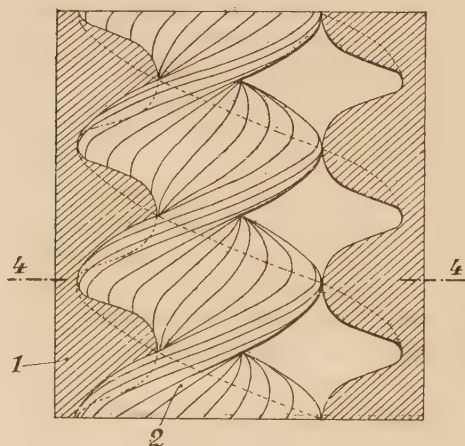


Fig. 3

L'enroulement en hélice des profils autour de leurs axes de rotation crée entre les éléments hélicoïdaux 1 et 2 des capacités dont la longueur égale le pas de l'élément externe.

Dans la fig. 3, chaque section droite coupe tantôt deux, tantôt trois capacités dont les sections croissent et décroissent successivement au fur et à mesure des mouvements relatifs des deux éléments hélicoïdaux 1 et 2.

Les sections de deux de ces capacités sont visibles en A B. Si on fait rouler d'un mouvement relatif l'élément interne 2 dans l'élément externe 1, les capacités se déplacent sans se déformer suivant un mouvement hélicoïdal le long de la roue externe. Dans l'exemple ci-dessus décrit les pas des hélices sont constants et les capacités A B sont de grandeur constante pendant la rotation.

Les sections élémentaires peuvent être empilées de telle sorte que le déplacement an-

gulaire entre elles ne soit pas constant pour un même déplacement élémentaire le long de l'axe longitudinal.

Dans ce cas, il faut toujours que pour une section droite des profils les pas instantanés externes et internes restent entre eux dans le rapport des nombres de dents. On se rend compte que pendant la rotation les capacités A et B changent de volume en se déplaçant. Cette particularité peut être utilisée avec les fluides compressibles, par exemple, pour obtenir avec des rotations déterminées des compressions ou des détenteurs suivant des lois déterminées, à la condition que les hélices de l'élément hélicoïdal externe I fassent plus d'un tour.

On pourra également faire varier uniformément ou non, les diamètres primitifs des éléments hélicoïdaux 1 et 2; dans ce cas, les axes longitudinaux 1 et 2 seront concourants.

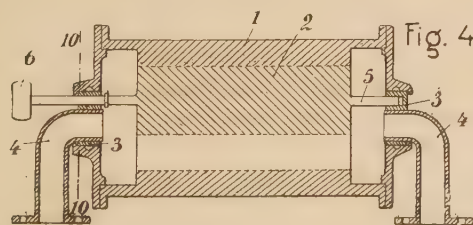
On pourrait aussi, en gardant une excentricité constante, varier uniformément ou non les diamètres des cercles enveloppes; dans ce cas, les axes longitudinaux des deux éléments resteront parallèles.

On voit que la rotation d'un élément par rapport à un autre déplace le long de l'axe des capacités limitées par les lignes de contact des deux engrenages.

Ces capacités sont constantes pendant la rotation et les dimensions E, D et P sont constantes, elles varient si E, D ou P ne sont pas constants.

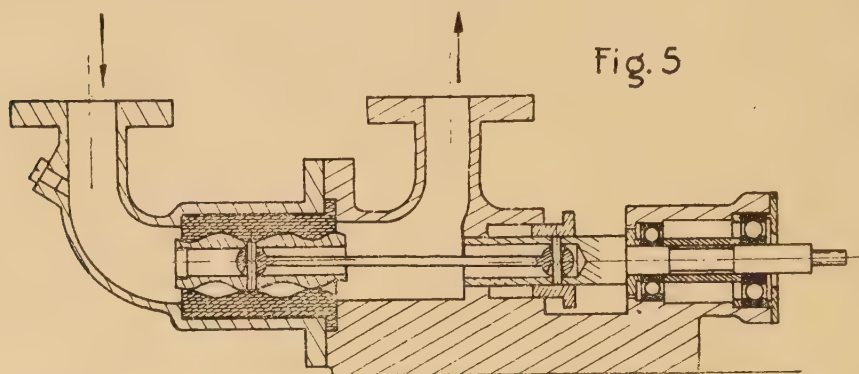
Dans le premier cas, le capsulisme R. M. agit comme un déplaceur de fluide; dans le deuxième cas, comme un compresseur ou un détenteur.

Si on utilise une certaine puissance pour obtenir une rotation relative des deux éléments, on constitue donc une pompe ou un compresseur; si, au contraire, on a une différence de pression d'une extrémité à l'autre du capsulisme, un débit traversant le capsulisme en fait un moteur avec la loi de détente que l'on désire.



La fig. 4 représente un mode d'utilisation des engrenages décrits. Les deux éléments 1 et 2 sont conformes à ceux de la fig. 3 et représentés pour simplifier par des cylindres égaux à ceux des cercles primitifs. Deux pièces 3 formant tou-

rillons sont liées à des supports 4 qui servent de tubes d'entrée et de sortie. La surface cylindrique des pièces 3 a pour axe l'axe de l'hélice externe 1, et l'une au moins d'entre elles est percée pour laisser passer l'arbre 5 portant l'élément hélicoïdal interne 2 et une poulie de commande 6.



Un autre dispositif est représenté fig. 5. L'engrenage intérieur tourne sans aucun guidage dans l'engrenage extérieur et se place de lui-même à chaque instant.

La rotation est commandée depuis le moteur par un arbre tournant dans un presse-étoupe et relié à l'engrenage interne par un arbre à deux cardans, un joint d'Oldham, ou tout autre dispositif qui permette le roulement d'un engrenage dans l'autre.

Tout autre montage convient s'il permet le roulement l'un dans l'autre des engrenages constituant le capsulisme R. M.

POMPE A PLUS DE DEUX ELEMENTS

Sur les fig. 6 et 7, dans lesquelles les éléments hélicoïdaux sont représentés schématiquement par leurs sections droites faites en un point quelconque de leur longueur, ces sections étant réduites aux courbes de base, on voit immédiatement que si l'on fait tourner la section de l'élément central 1 autour de la trace O^1 de l'axe de cet élément, par exemple dans le sens de la flèche f' , fig. 6, le centre O^2 de la section droite de l'élément intermédiaire 2 tourne autour du

centre O^1 en sens inverse (flèche f') tandis que cette section droite de l'élément 2 tourne autour de son propre centre O^2 dans le même sens (flèche f'). En comparant les figures 6 et 7 on voit que lorsque l'élément 1 passe par exemple à la position 1' après une rotation x

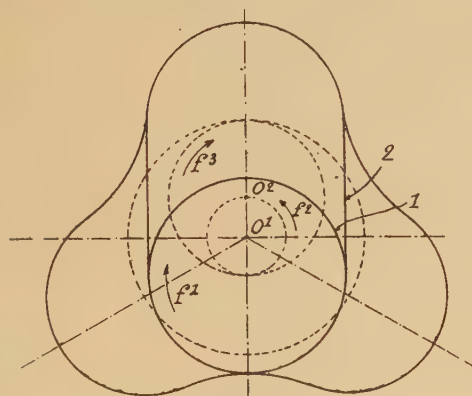


Fig. 6

de 90° dans le sens de la flèche f' , l'élément 2 est venu en 2', son centre étant venu en O^2 par une rotation y autour de O^1 , dans le sens de la flèche f' , et cette section ayant tourné de z dans le sens de f' autour de O^2 .

En définitive, on voit donc que la rotation de l'élément 1 provoque une rotation de l'élément 2 qui, du même coup, subit un déplacement angulaire par rapport à l'élément fixe 3.

Ce qui est vrai pour une section droite, l'est pour toutes. En définitive, chaque groupe de deux éléments 1 et 2, et 2 et 3, constitue un engrenage déterminant des cavités closes qui, sans déplacement longitudinal des éléments, se déplacent axialement pendant la rotation en transportant leur contenu d'une extrémité à l'autre de l'engrenage, de telle sorte que ce dernier peut être utilisé comme pompe, compresseur, moteur.

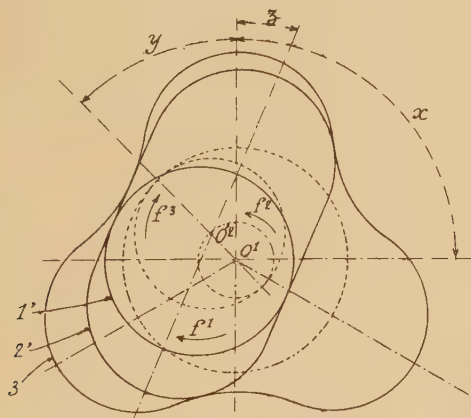


Fig. 7

Ces débits du fluide circulant dans les deux groupes précités s'additionnent.

On voit que le débit est plus grand pour un encombrement sensiblement égal que s'il n'y avait qu'un seul engrenage à deux éléments, qu'il n'y a besoin d'aucune liaison élastique par joints de cardan, ou autres, que le balourd dû à la rotation excentrée de l'axe de l'élément 2 est réduit parce que cette pièce est creuse et peut être légère et parce que la rotation de son centre de gravité est à vitesse réduite (la moitié de celle de l'élément 1 dans l'exemple décrit).

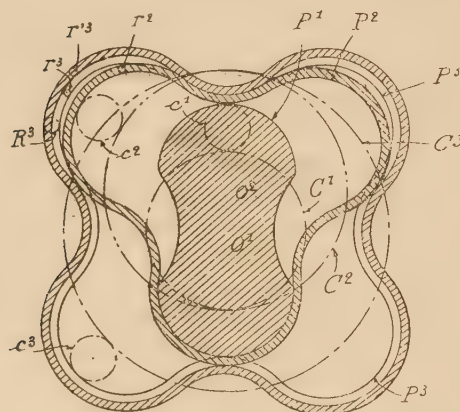


Fig. 8

Les figures 8 et 9, représentent des exemples de profils qui peuvent être employés pour la construction des engrenages. La fig. 8 représente une section droite d'une famille d'engrenages dont les éléments 1, 2, 3 ont deux trois ou quatre dents ou, d'une manière plus précise, deux, trois ou quatre filets hélicoïdaux. Les cercles primitifs C^1 , C^2 , C^3 de ces éléments 1, 2, 3 ont des diamètres dans les rapports de deux, trois et quatre et les profils

fil de base, P^1 , P^2 et P^3 de ces profils sont des épicycloïdes e^1 , e^2 , e^3 , raccordées à des hypocyloïdes h^1 , h^2 , h^3 , dont les cercles générateurs c^1 , c^2 , c^3 , roulant sur les cercles C^1 , C^2 , C^3 , ont un diamètre égal à l'excentricité $O^1 O^2$ entre ces cercles.

L'élément I peut être plein.

Pour obtenir une épaisseur pour l'élément 2, on prend comme profil extérieur de cet élément 2, l'enveloppe d'un petit cercle r^2 , roulant sur le profil de base P^2 de cet élément 2.

Quant à l'élément extérieur 3, son épaisseur est comprise entre les enveloppes de deux cercles R^3 et r^3 , roulant sur le profil de base P^3 ou, ce qui revient au même, ainsi qu'on peut le démontrer facilement, entre l'enveloppe du cercle r^3 roulant sur le profil de base P^3 et l'enveloppe d'un cercle r'^3 roulant sur ladite enveloppe du cercle r^3 .

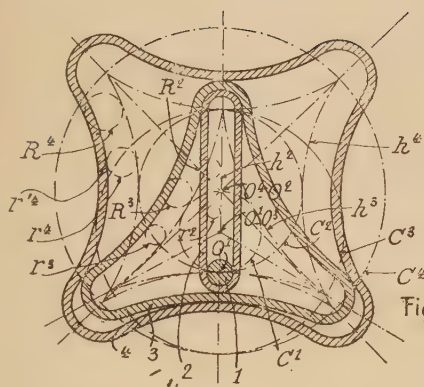


Fig. 9

La fig. 9 représente une section droite d'une famille d'engrenages dont les éléments hélicoïdaux 1, 2, 3, 4 sont respectivement à une, deux, trois et quatre dents (ou, d'une manière plus précise, à un, deux, trois et quatre filets hélicoïdaux). Les cercles primitifs C^1 , C^2 , C^3 , C^4 des éléments 1, 2, 3, 4 ont une diamètre dans les rapports de un, deux, trois et quatre. Une particularité de la disposition représentée est

que les cercles primitifs C^1 , C^3 , des éléments 1 et 3 à nombre impair de dents ont leurs centres O^1 et O^3 confondus, et il en est de même pour les centres O^2 et O^4 des cercles primitifs C^2 et C^4 des éléments 2 à 4 à nombre pair de dents.

Les courbes de base sont constituées par des hypocycloïdes h^1 (réduite au point O^1), h^2 (une droite), h^3 , h^4 dont les cercles générateurs, non représentés, roulant dans les cercles primitifs C^1 , C^2 , C^3 , C^4 , ont un rayon égal à l'excentricité desdits cercles primitifs.

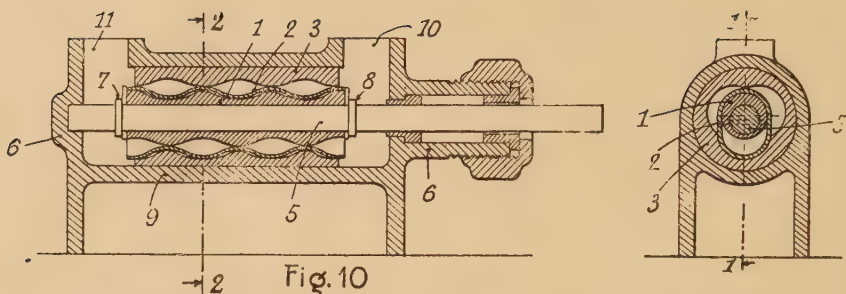
L'élément 1 est plein et construit en faisant rouler autour du point de base (O^1 sur la fig.) un petit cercle.

Les épaisseurs des éléments 2, 3, 4 sont obtenues comme dans l'exemple précédent en faisant rouler sur les hypocycloïdes h^2 , h^3 , h^4 :

Pour l'élément 2, des cercles ou roulettes r^2 et R^2 sur l'hypocycloïde h^2 , le rayon du cercle r^2 étant égal à celui du petit cercle qui a servi à déterminer l'élément 1;

Pour l'élément 3, des cercle ou roulettes r^3 et R^3 ;

Pour l'élément 4, des cercles ou roulettes r^4 et R^4 (ou r^4 et r^4).



La fig. 10 représente une réalisation d'un capsulisme R. M. qui comporte trois éléments d'engrenages hélicoïdaux 1, 2, 3, intérieurs l'un à l'autre. L'élément extérieur 3 comporte trois dents ou filets, l'élément intermédiaire 2 en comporte deux, et l'élément central 1 n'a qu'une dent ou filet. Les pas des filets sont constants et sont dans les rapports respectifs de trois, deux, un.

L'hélicoïde extérieur 3 présente au moins un tour, ce qui est nécessaire pour l'étanchéité du groupe 2, 3.

L'hélicoïde interne 1 est porté par un arbre 5 qui repose à ses extrémités dans des paliers 6, mais l'un des paliers peut être supprimé. L'élément intermédiaire 2 est fou en rotation et maintenu en butée à chaque extrémité, par exemple par des rondelles 7, 8, portées par l'élément central 1. L'élément extérieur 3 est fixe. Il est logé dans, ou vient de matière avec le carter 9 qui comporte en 10 et 11 des raccords destinés à l'entrée ou à la sortie du fluide, soit moteur, soit transporté par le capsulisme.

Il est intéressant de noter que, dans ce dispositif, les engrenages à une et trois dents sont concentriques et que seul l'engrenage à deux dents tourne avec un balourd. D'ailleurs, on peut noter que

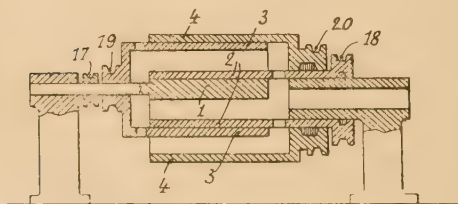


Fig. 11

tous les engrenages à nombre impair de dents peuvent être concentriques et que tous les engrenages à nombre pair ont aussi un centre commun. Il en résulte les possibilités de réaliser un capsulisme schématiquement représenté par la fig. 11.

FONCTIONNEMENT

DEBIT THEORIQUE

Nous commençons par supposer le Pas, l'Excentricité et s'il y a lieu, le Diamètre comme constants dans toutes les sections des éléments.

Dans chaque section la différence des sections des éléments est constante et son produit par le pas de l'élément externe mesure la capacité du capsulisme. Il est donc clair que le volume engendré par tour relatif est égal à cette capacité.

Il est intéressant d'étudier cette question dans le cas des engrenages habituellement employés.

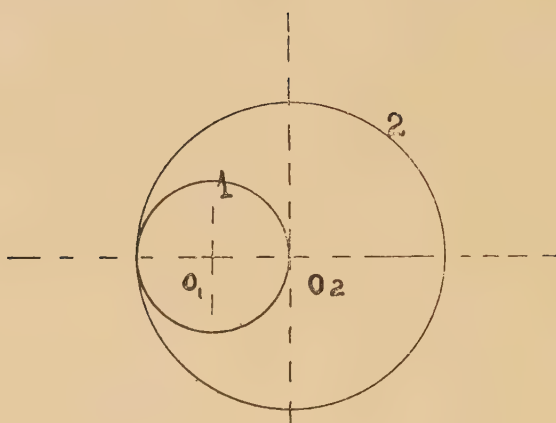


Fig. 12

Si r est le rayon de la circonférence de centre O_1 , la vitesse instantanée de O peut être exprimée de deux façons, soit $\omega_1 r$, soit $-ur$ donc $\omega_1 = -u$.

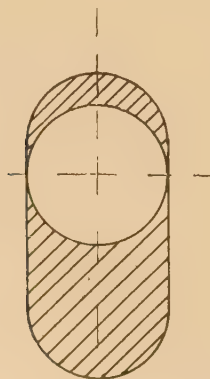


Fig. 13

(a) Supposons d'abord le cas de une et deux dents.

Deux engrenages intérieurs définis par leurs diamètres primitifs sont dans le rapport de 1 à 2 (fig. 12).

2 est fixe.

O_1 tourne autour de O_2 avec une vitesse angulaire u .

Soit ω_1 la rotation de 1 sur lui-même.

Donnons à tous le système une vitesse de rotation autour de O_2 égale à $-u$.

Si donc je commande la rotation de O_1 sur lui-même, le volume V débité par le capsulisme est :

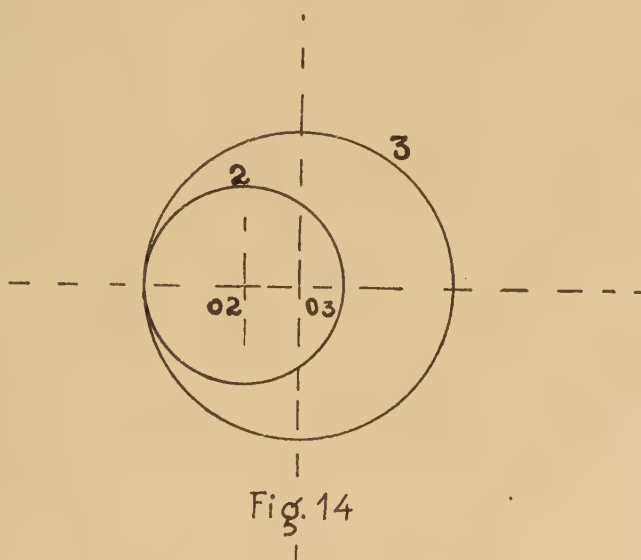
$$V = N.60.s.P$$

s étant la surface hachurée sur la figure 13.

N compté en tours/mi-nute.

Cas de deux et trois dents :

Deux engrenages définis par leurs cercles primitifs sont dans le rapport 2 à 3, fig. 14.



3 est fixe, O_2 tourne autour de O_3 avec une vitesse angulaire u ,
 ω_2 est la vitesse de rotation de 2 sur lui-même.

e étant la distance des centres O_2 et O_3 ,

on a, comme plus haut : $2e\omega_2 = -eu$

$$\text{d'où } \omega_2 = -\frac{u}{2}$$

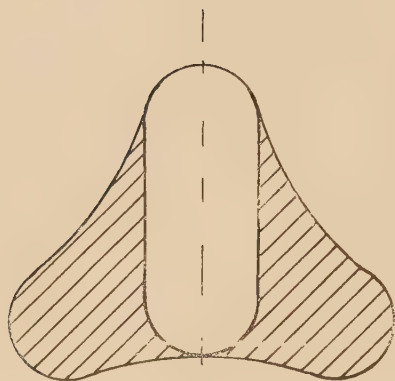


Fig. 15

Si donc on commande la rotation de l'engrenage à deux dents :

Quand 2 a fait un demi-tour, O_2 est revenu à son point de départ.

Tous les demi-tours de 2 le volume débité par le capsulisme est $s.P$.

s étant la surface hachurée sur la figure 15.

On a donc, comme plus haut :

$$V = 2.N.60.s.P$$

Cas général :

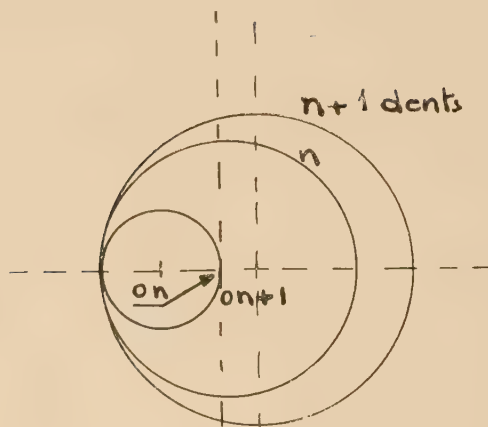


Fig. 16

Ici aussi nous posons :

P = pas de l'engrenage à $n + 1$ dent.

s = surface utile comme précédemment.

L'engrenage à $n+1$ dents est fixe.

ω_n est la vitesse de l'engrenage à n dents sur lui-même, u la vitesse de O_n autour de O_{n+1} .

e étant l'excentricité, on trouve, comme précédemment : $ne\omega_n = -eu$

$$\text{d'où } \omega_n = -\frac{u}{n}$$

et pour le débit, quand on commande la rotation de l'engrenage à n dents :

$$V = n.N.60.s.P$$

Cas de trois engrenages ayant respectivement une, deux et trois dents :

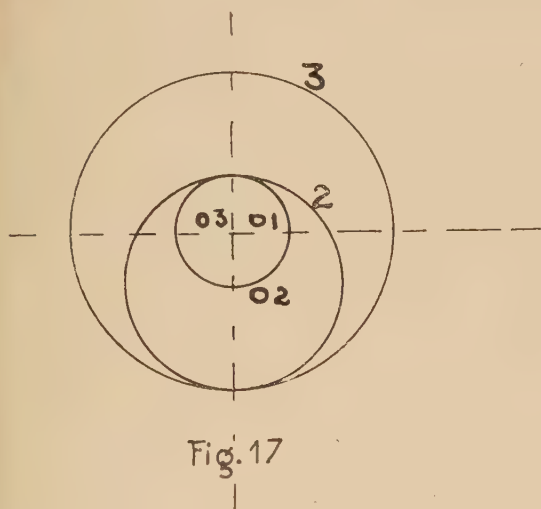


Fig. 17

L'engrenage à trois dents est fixe, les points O_1 et O_2 sont fixes.

Soit ω_1 la vitesse de rotation de l'engrenage à une dent sur lui-même, ω_2 celle de l'engrenage à deux dents, u la vitesse de rotation de O_2 autour de O_1 .

La considération des centres instantanés de rotation donne de suite comme précédemment :

$$4e \omega_2 = e \omega_1 = -2au$$

c'est-à-dire

$$\omega_2 = -\frac{u}{2} = \frac{\omega_1}{4}$$

Quand l'engrenage a une dent fait un tour sur lui-même, l'engrenage à deux dents fait $1/4$ de tour sur lui-même, O_2 fait autour de O_1 $1/2$ tour en sens inverse.

Soit S et s les surfaces respectives.

Le débit est la somme de $\frac{S.P}{2}$ et de $(1 - \frac{1}{4}) s \frac{2}{3} P$

c'est-à-dire $V = N.60.P.(S+s)$

Formule générale du débit :

Soient :

n engrenages les uns dans les autres;

N la vitesse en tours/minutes du plus petit des engrenages, sur lui-même;

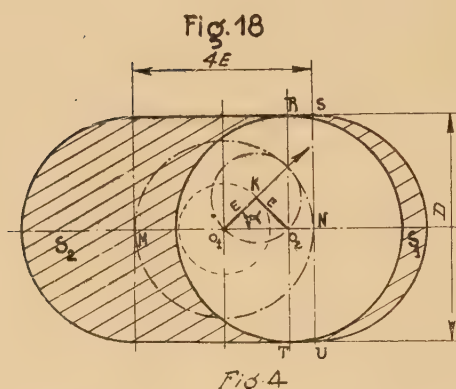
P le pas du plus grand engrenage;

Σs la surface utile d'une section droite.

Les engrenages de rang pair ont même centre commun et il en est de même pour ceux de rang impair.

On a :

$$V = \frac{1}{n - 1} \cdot N \cdot 60 \cdot P \cdot \Sigma s$$



Il est à noter que dans tous les cas le débit est constant à chaque instant :

Le seul examen des formules ci-dessus et des figures 18 et 19 le montre.

On voit, à la fig. 18, comment la section circulaire de l'engrenage a une dent se déplace dans l'engrenage à deux dents; la somme des sections $S_1 + S_2 = 4 E D$.

La fig. 19 représente les variations de S_1 et de S_2 en fonction de l'angle α :

$$S_1 = (1 - \cos \alpha) 2 E D$$

$$S_2 = (1 + \cos \alpha) 2 E D$$

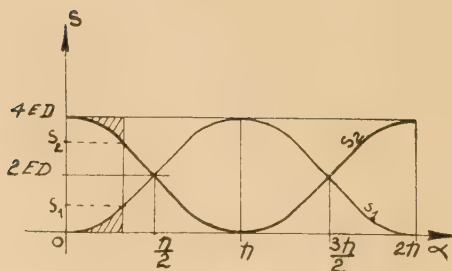


Fig. 19

Le débit de la pompe est égal à la variation des dernières sections multipliées par le déplacement et on voit qu'il ne varie pas puisque les deux triangles hachurés sont égaux.

DEBIT PRATIQUE, LIGNE DE FUITE

Dans un mécanisme R. M., les capacités sont délimitées par des lignes de contact de deux engrenages hélicoïdaux.

Pour un débit donné, c'est la combinaison qui a le moins de dents qui a la plus petite ligne de fuite. C'est donc toujours la combinaison à une et deux dents, qui aura le meilleur rendement volumétrique.

Parmi les tracés à une et deux dents, c'est celui de la figure 18 qui est le plus simple à usiner puisque la section de l'engrenage à une dent est toujours un cercle (et nous étudions cette question en détail plus loin). C'est, en fin de compte, cette combinaison qui a été choisie pour la plupart des capsulismes R. M. réalisés jusqu'à ce jour.

Volume engendré :

Dans cette combinaison, le volume engendré est égal au produit de $S_1 + S_2$ par le pas P du stator et par le nombre de tours.

$$V = 4E.D.P.N$$

Variations du débit de la pompe en fonction de la précision des engrenages et de la pression de refoulement :

La portion des lignes de contact du rotor et du stator qui sépare les capacités à haute pression des capacités à basse pression, constitue une ligne de fuite de longueur constante pour chaque type de pompe.

Si le jeu compris entre le rotor et le stator est égal à j , il existe une section de fuite déterminée pour chaque type de pompe, et la fuite F , au travers de cette section varie avec la pression de refoulement.

Il est intéressant de rechercher l'aspect de cette ligne de fuite, et j'en représente deux tracés sur les figures 20 et 21.

On voit que ces courbes sont des éléments de courbes gauches reliées par des demi-cercles tels que A B.

La section du rotor suivant un plan passant par son axe peut être calculée. En effet, un rotor a pour section droite des cercles empilés en hélice et excentrés de E (voir fig. 22).

L'ordonnée x de la section recherchée varie en fonction de α suivant l'équation :

$$x = E \cos \alpha \pm \sqrt{R^2 - E^2 \sin^2 \alpha}$$

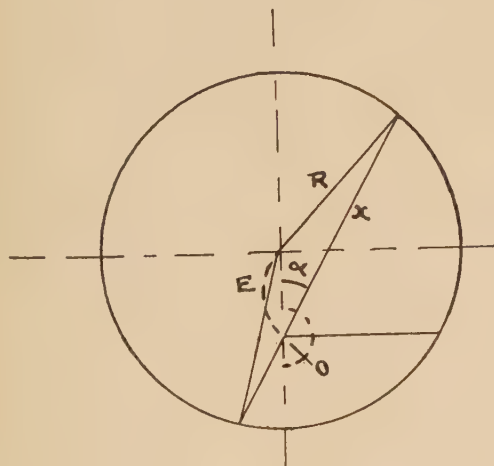


Fig. 22

Les racines existent pour toutes les valeurs α .

Si $R > E$, une racine est positive et l'autre négative.

La courbe a l'aspect de la fig. 20.

Si $R = E$, une des courbes est une sinusoïde exacte et l'autre une droite (fig. 21).

Si $R < E$, l'équation est inchangée et les sections sont des lignes discontinues.

Il faut noter que le coefficient K_1 de la formule de la page 23 est très petit, grâce à la forme des surfaces schématisées ci-contre (fig. 23).



Fig. 23

La surface mobile va toujours en sens inverse de la fuite et constitue une lubrification qui en fait empêche le contact des parois à la façon des paliers Mitchell.

VITESSE DE ROTATION

LIMITE INFÉRIEURE

Le fonctionnement de la pompe est normal quand la fuite est petite par rapport au volume engendré.

En examinant la formule du débit, on remarque que la vitesse de rotation peut être d'autant plus petite que la hauteur manométrique d'élévation est plus faible, que le jeu J est plus petit, que les dimensions de la pompe sont plus grandes.

La ligne de fuite croît comme les dimensions linéaires de la pompe, tandis que le volume engendré croît comme le cube de ces dimensions.

LIMITE SUPÉRIEURE

Chaque molécule d'eau, en passant au travers de la pompe, décrit une hélice de pas P tracée sur un cylindre dont le diamètre peut atteindre $4E + D$.

A chaque tour de rotor, la plus longue des trajectoires parcourues par les molécules d'eau a une longueur X .

$$X = \sqrt{\pi^2 (4E + D)^2 + P^2}$$

Si le rotor fait n tours par seconde, la vitesse maximum du liquide au travers de la pompe est :

$$V_1 = X \times n$$

D'autre part, pour une hauteur d'aspiration égale à h mètres, la vitesse d'écoulement d'eau, à l'entrée de la pompe est limitée en mètres par seconde à :

$$V_2 = \sqrt{2 \times 9,81 (10,33 - h)}$$

10,33 étant la pression barométrique en mètres d'eau;

9,81 étant l'accélération due à la pesanteur.

Pour que la pompe ne cavite pas et se remplisse entièrement, il faut que la vitesse de rotation soit telle que V_1 soit inférieure ou au plus égale à V_2 .

Pour une hauteur d'aspiration nulle, $V_2 = 14$ mètres par seconde.

Pour une hauteur s'aspiration de 8 mètres, on voit que $V = 6$ mètres 70, etc...



CONSIDERATIONS SUR LE CHOIX DE E, D, P

Dans le cas usuel où l'engrenage à une dent est de section circulaire, on peut étudier de plus près les relations souhaitables entre E, D, P, en se posant certaines conditions :

On se rappelle que le débit de la pompe est de la forme :

$$(1) \quad Q = 4E.D.P.N$$

et que la plus grande vitesse du liquide au travers de la pompe est :

$$(2) \quad V = N \sqrt{\pi^2 (4E + D)^2 + P^2}$$

(1°) Quelle est la relation qui doit exister entre D et E pour que le produit $4E \times D$ soit maximum pour un diamètre d'encombrement donné; ceci revient à chercher la relation entre D et E qui donne le produit $4E \times D$ maximum quand la somme $4E + D$ est déterminée, relation bien connue : $4E = D$.

(2°) Le problème est alors de trouver une relation entre D et P qui fasse Q maximum pour une vitesse V qui satisfasse l'équation 2.

En annulant les dérivées par rapport à D et P, j'ai :

$$(3) \quad \frac{d Q}{d D} + \lambda \frac{d V}{d D} = 0$$

$$(4) \quad \frac{d Q}{d P} + \lambda \frac{d V}{d P} = 0$$

λ étant une constante auxiliaire qui s'éliminera tout à l'heure.

En calculant (3) et (4) il vient, N s'éliminant de suite :

$$(5) \quad 4E P + \frac{\lambda \pi^2 (4E + D)}{\sqrt{\pi^2 (4E + D)^2 + P^2}} = 0$$

$$(6) \quad 4E P + \frac{\lambda P}{\sqrt{\pi^2 (4E + D)^2 + P^2}} = 0$$

En tirant λ de (5) pour le porter dans (6),
il vient :

$$(7) \quad P^2 = \pi^2 D (4E + D)$$

Et si nous admettons $4E = D$,

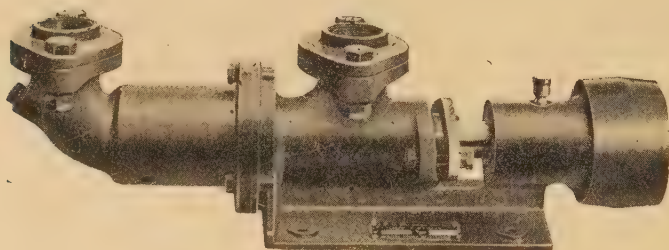
on a :

$$P = \pi D \sqrt{2}$$

Il va de soi que d'autres conditions, telles que des conditions d'usinage, peuvent influencer sur le choix de E, D et P, mais l'expérience a montré que les capsulismes R. M. s'écartent peu des conditions théoriques.

DESCRIPTION D'UN CAPSULIME R. M. A USAGE DE POMPE

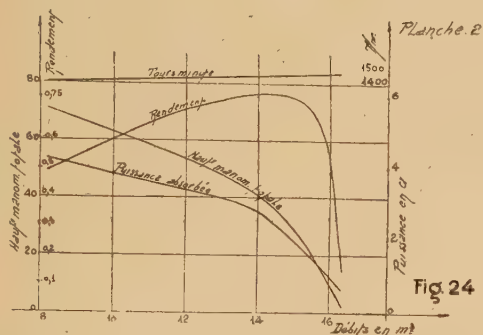
La photographie ci-contre représente une pompe conforme au dessin de la figure 5.



Un perfectionnement industriel notable tant pour l'usinage que pour l'étanchéité a consisté à établir le stator en caoutchouc pour les liquides n'attaquant pas cette matière; de cette façon, le rotor peut se mouler en quelque sorte dans le stator aux points de contact, d'où étanchéité parfaite; non seulement il n'y a pas frottement nuisible, puisque l'eau joue ici un rôle de lubrifiant, mais le stator enrobera temporairement les grains de sable et autres impuretés qui auraient pu pénétrer dans la machine, de sorte que rien ne sera endommagé. La résistance à l'usure est exceptionnelle. Enfin, le stator en caoutchouc améliore encore les qualités de silence.

Divers caoutchoucs synthétiques permettent d'ailleurs le pompage de tous les liquides.

ASPECT DES COURBES CARACTERISTIQUES EXPERIMENTALES



La fig. 24 représente les courbes caractéristiques d'une pompe à eau dont les constantes sont :

$$\begin{aligned} D &= 40, & p &= 100 \\ P &= 200, & E &= 6 \end{aligned}$$

Le volume engendré par heure à 1.500 t/m = 17.250 litres.

On remarque :

1° Que le rendement vo-

lométrique varie peu avec la pression de refoulement;

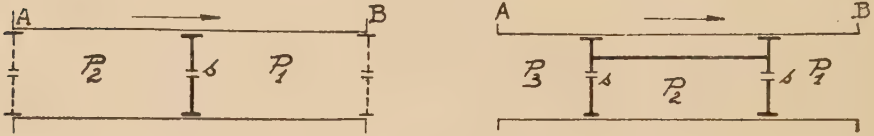
2° Que le rendement de cette petite pompe atteint 76 %;

3° Que la courbe de rendement comporte un long palier et que, par suite, la pompe fonctionne dans de bonnes conditions entre des limites d'utilisation très éloignées.

POMPES A PLUSIEURS ETAGES

Une pompe Moineau peut schématiquement (fig. 25) être considérée comme une cloison se déplaçant dans un tube A B, telle que, quand cette cloison arrive en B, une nouvelle cloison apparaisse en A.

Fig. 25



La fuite est représentée par un petit orifice de section S.

La pression maximum P_1 que l'on peut obtenir est celle où le débit de la pompe est égal au débit de la fuite :

$$Q = S \sqrt{2g (P_1 - P_2)} \quad \text{que j'écris } Q = f (P_1 - P_2)$$

Pour une pompe comportant deux longueurs de pas égaux, tout se passe comme s'il y avait deux cloisons reliées entre elles et se déplaçant à la même vitesse.

Chaque cloison a une fuite de section S et je suppose les sections égales.

En tout cas, les débits de fuite sont forcément égaux puisque la cavité intermédiaire est de volume constant, et les liquides incompressibles. Ces fuites, qui sont dues aux différences de pression, ont un débit :

$$q = f (P_1 - P_2) = f (P_2 - P_3).$$

Il en résulte que :

$$P_1 - P_2 = P_2 - P_3, \text{ donc que :}$$

$$P_1 - P_3 = 2(P_1 - P_2) = 2(P_2 - P_3)$$

On continuerait de même avec un nombre quelconque de cloisons, par conséquent avec un nombre quelconque de pas (de l'engrenage extérieur).

Des manomètres placés en plusieurs points de pompes à plusieurs tours ont montré l'exactitude rigoureuse du phénomène.

EQUILIBRAGE

Les forces qui résultent du fonctionnement de la pompe sont de deux sortes :

- 1° Les forces centrifuges;
- 2° La pression des fluides.

Il est intéressant de voir comment elles peuvent gêner et, dans ce cas, comment elles pourront être équilibrées.

Je me bornerai à l'étude des engrenages à une et deux dents, tous les autres s'y ramenant aisément.

FORCES CENTRIFUGES

On sait qu'un capsulisme R. M. se compose de deux engrenages dont les cercles primitifs roulent l'un dans l'autre.

Un premier moyen d'équilibrage est de maintenir fixes les centres de gravité en faisant tourner les deux engrenages autour de leur axe, en ayant soin que l'engrenage à nombre impair de dents, ici une dent, soit équilibré dynamiquement et ait, par exemple, pour longueur un nombre entier de pas ou soit équilibré en conséquence.

On voit, fig. 4, un tel dispositif. Il n'y a, en somme, dans ce cas, pas à faire d'équilibrage à proprement parler.

Mais si l'engrenage extérieur ne tourne pas, comme cela a lieu le plus souvent, et, dans ce cas, nous l'appelons stator, alors l'engre-

nage intérieur, rotor, tourne en créant une force centrifuge égale au carré de la vitesse ω de rotation multiplié par l'excentricité du rotor et par sa masse. Le balourd est assez petit dans les petites machines pour être négligé, surtout si le stator est en caoutchouc.

Dans les machines plus importantes, on emploie les procédés suivants :

a) *Rotor flottant.*

Si l'ensemble du rotor a une densité égale à celle du liquide pompé, la pompe est équilibrée; en effet, dans la pompe, l'ensemble (rotor, liquide) tourne à la même vitesse.

On gagne toujours à avoir recours à ce procédé, même partiellement. Il est évidemment d'autant plus facile à employer que les appareils sont plus grands. Mais il n'est pas applicable avec les fluides gazeux.

b) *Equilibrage par des masses additionnelles.*

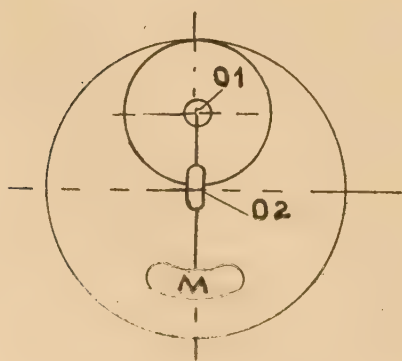


Fig. 26

Le principe de ce procédé est schématisé ci-contre : Les cercles (fig. 26) sont les cercles primitifs des deux engrenages. Une masselote M est accrochée au centre O_1 de l'engrenage à une dent, et une g'issière entoure le centre O_2 de l'engrenage à deux dents, de façon que la M soit toujours diamétralement opposée à O_1 , par rapport à O_2 .

Ou bien (fig. 27), deux roulettes r roulent sur un cercle

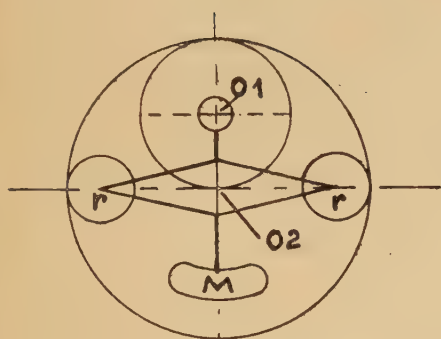


Fig. 27

ayant un pas à droite, l'autre un pas à gauche, de façon à éviter toute poussée axiale, j'ai placé l'équilibrage entièrement au centre et réalisé suivant le schéma de la figure 28.

On reconnaît le schéma de la fig. 27, mais la masse M a été divisée en deux.

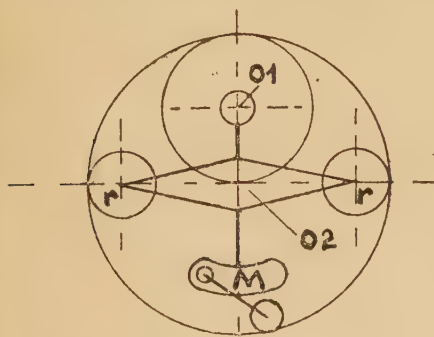


Fig. 28

concentrique à O_2 pour maintenir $O_1 M$ en position. On voit que comme O_1 , O_2 est en général petit (actuellement quelques millimètres) la masse M peut être beaucoup plus petite que la masse du rotor.

De tels dispositifs sont généralement placés à chaque extrémité du rotor.

Dans une variante, ayant à équilibrer une soufflante qui comportait deux rotors fixés l'un au bout de l'autre, l'un

M équilibre une partie du rotor calculée de façon que les efforts centrifuges qu'il produit compensent exactement les efforts centrifuges qui tendent à faire fléchir l'arbre commun aux deux rotors et le galet remorqué par M équilibre le reste non équilibré par M.

De tels dispositifs conviennent pour les liquides et les gaz, mais plus particulièrement pour ces derniers, en

raison des pertes par frottement qu'ils engendreraient dans les liquides.

On pourrait concevoir les masselotes d'équilibrage à l'intérieur du rotor. On pourrait aussi les placer entièrement hors de l'appareil, ce qui serait peut-être intéressant pour de grosses machines.

c) *Equilibrage à quatre corps ou plus de quatre.*

On sait que si dans une même enceinte on met plusieurs balourds, on peut en les plaçant convenablement les compenser plus ou moins complètement les uns par les autres.

Dans le cas d'un capsulisme R. M., au moins quatre capsulismes semblables, convenablement placés, permettent un équilibrage rigoureux.

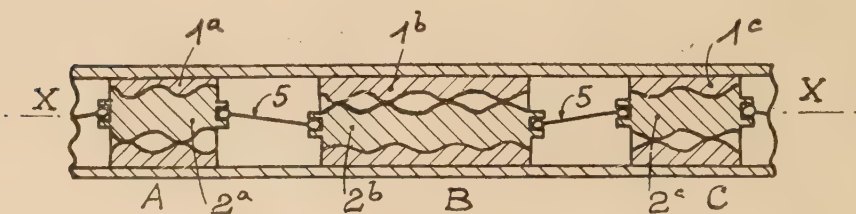


Fig. 29

On peut voir pour chacun des dispositifs représentés aux fig 29 à 34, que sous la réserve que les rotors soient équilibrés chacun autour de son axe propre, et qu'ils soient tous semblables, on peut toujours les caler dans des positions telles que les projections des forces centrifuges aient une résultante nulle.

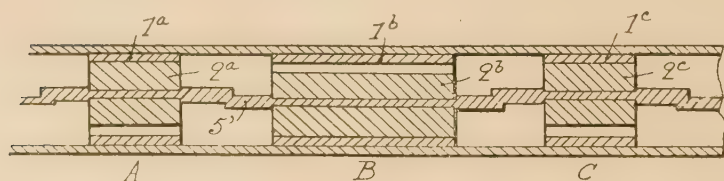
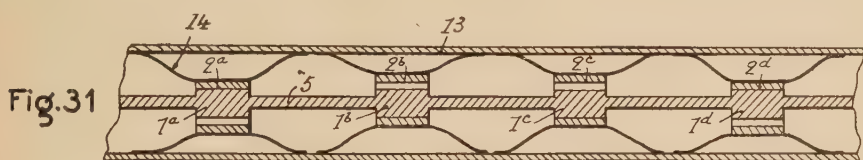


Fig. 30

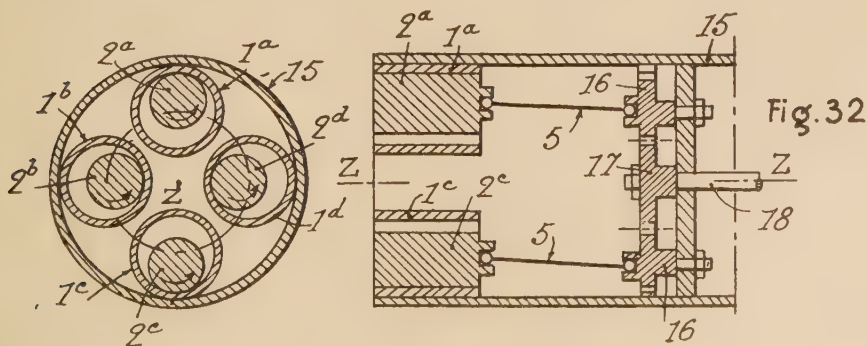
De telles dispositions sont représentées aux figures 29 et 30, dans lesquelles les axes des éléments internes $2a$ et $2c$ sont disposés au-dessus de l'axe commun xx des éléments externes, tandis que l'axe des éléments internes $2b$ intermédiaires et de longueur double est disposé au-dessous dudit axe xx et à la même distance.

Tout ce qui vient d'être dit subsiste si ce sont des éléments internes 2 qui sont assemblés rigidement; il suffit, dans ce qui précède, de remplacer le mot : externe, par le mot interne, et réciproquement.



Un tel dispositif est représenté à la figure 31, dans laquelle l'arbre 5 est rectiligne et rigide, les axes des éléments internes $1a$ $1b$, $1c$ $1d$, étant confondus avec l'axe de cet arbre 5; au contraire, les axes des éléments externes $2a$, $2b$, $2c$, $2d$ occupent des positions différentes. Ces éléments externes sont maintenus dans un carter commun par des supports individuels, déformables, par exemple en caoutchouc.

Un autre mode d'assemblage consiste à grouper côte à côte, parallèlement les uns aux autres, dans une enceinte, plusieurs mécanismes semblables ou non, en les commandant par exemple par des engrenages.



Dans la fig. 32, les éléments 2a, 2b, 2c, 2d tournent tous dans le même sens et les éléments 2b et 2d sont dans leur position la plus rapprochée de l'axe zz , quand les éléments 2a et 2c sont les plus éloignés et réciproquement.

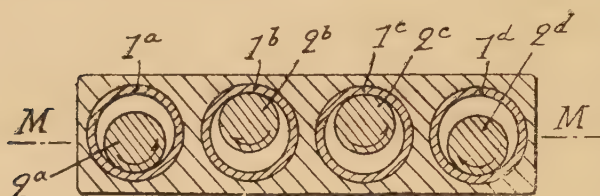


Fig. 33

1a, 1b, 1c, 1d soient disposés d'un côté de ce plan MM , tandis que les axes des éléments internes 2b et 2c des groupes intermédiaires sont disposés à la même distance de ce plan MM mais du côté opposé. Grâce à cette disposition, les efforts perpendiculaires au plan MM s'équilibrent deux à deux et il en est de même des efforts parallèles au dit plan.

La fig. 34 montre une disposition dans laquelle, quatre groupes sont disposés en étoile.

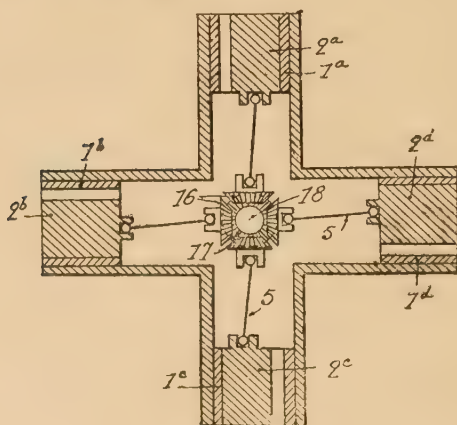


Fig 34

La commande est assurée à partir d'un arbre central 18, par exemple, par l'intermédiaire d'un pignon 17, de pignons 16 et d'arbres 5 à cardans (ou dispositifs similaires).

Ce dispositif d'équilibrage est comparable à la multiplication des cylindres dans les moteurs à piston, bielle et manivelle, mais il faut remarquer que l'équilibrage est rigoureusement exact à partir de quatre corps, car les bielles

s'équilibrent en même temps que leurs rotors.

On peut imaginer un grand nombre de dispositifs analogues, notamment dans le cas des capsulismes multiples, par exemple comportant plus de deux engrenages.

De même des combinaisons d'équilibrage par corps multiples et par masses additionnelles peuvent être avantageux par exemple dans le cas de deux et de trois corps.

PRESSIION DES FLUIDES

Les pressions des fluides donnent naissance à des efforts axiaux et à des efforts radiaux qui s'exercent sur les rotors, les stators ou les éléments d'arbres.

EFFORTS AXIAUX

Pour une pression constante, ces efforts sont constants; différents dispositifs permettent de diminuer ou d'annuler ces efforts.

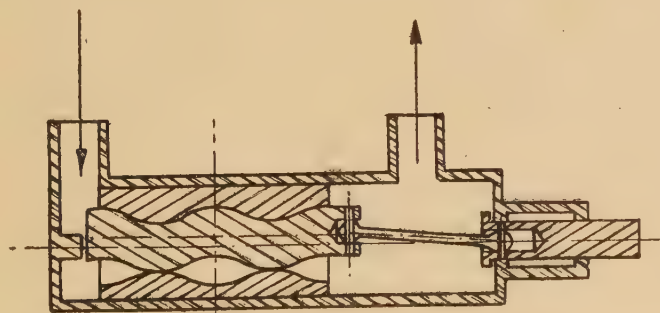
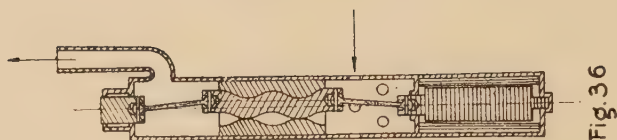


Fig. 35

On voit sur la fig. 35 une pompe semblable aux pompes normales actuelles, mais sur laquelle on a augmenté le diamètre de l'arbre qui passe dans le presse-étoupe, et placé le refoulement de ce côté de façon que la pression du fluide pousse le rotor d'un côté et cet arbre de l'autre, de sorte que l'effort axial résultant sur l'arbre de commande soit diminué.



De petites butées limitent les déplacements de part et d'autre.

Sur la figure 36, on voit un

dispositif analogue, mais monté du côté opposé à l'arbre qui transmet la puissance du moteur.

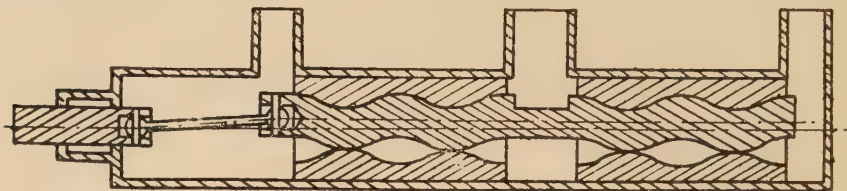


Fig. 37

Sur la figure 37, on met un dispositif à stator droit et gauche équilibrant la poussée axiale.

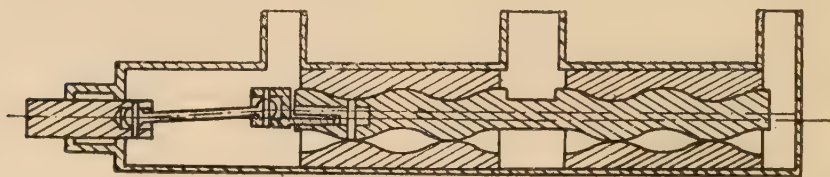


Fig. 38

La figure 38 est particulièrement intéressante.

L'expérience a confirmé que deux rotors reliés ont une position d'équilibre longitudinal stable dans leurs stators, indépendamment de toute liaison (tournevis sur la fig. 38) ne transmettant aucune poussée axiale.

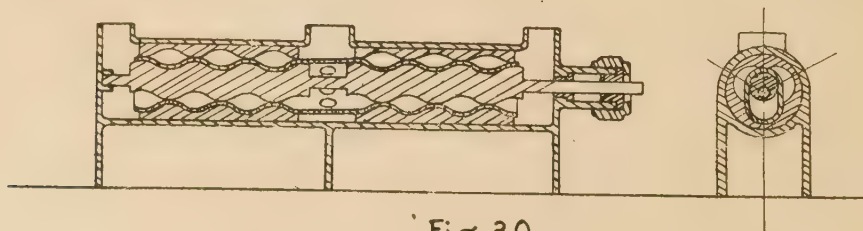


Fig. 39

La figure 39 dérive de la précédente en l'appliquant à une pompe à trois engrenages, ayant une, deux et trois dents.

EFFORTS RADIAUX

Un capsulisme R. M. peut être considéré comme un transporteur de fluide conforme à la fig. 40.

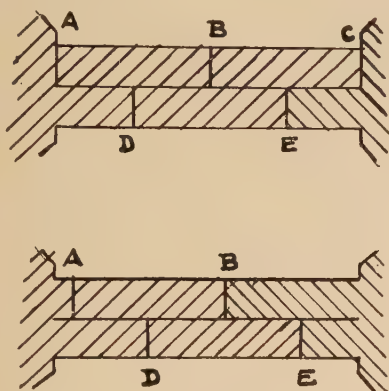


Fig. 40

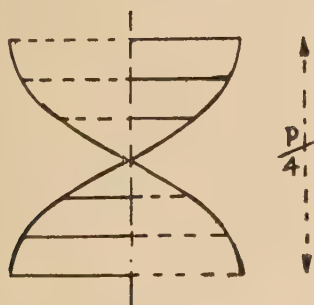


Fig. 41

Quand l'un des engrenages tourne par rapport à l'autre, les cloisons A, B, C, D, E se déplacent en bloc et en étudiant la suite de ces positions, on verrait qu'il y a déséquilibre de pression en négligeant les fuites seulement pour un quart du pas CE, pour la première figure, BE pour la deuxième.

Mais cette région du quart du pas est hélicoïdale et c'est la somme des pressions élémentaires le long du pas qui est à considérer fig. 41.

Si K est la pression par unité de surface, de la paroi du rotor,

D le diamètre des rotors,

P le pas du stator,

α l'angle dont a tourné la force depuis l'origine,

x la fraction du quart du pas correspondant,

F la force recherchée,

on a : $df = D.K.dx$

et $df \sin \alpha = D.K.dx \sin \alpha$

on a entre $\frac{P}{4}$ et α la relation

$$\frac{P}{4} = \frac{x}{\alpha}$$

$$\text{d'où} \quad x = \alpha \frac{P}{4\pi} \quad \text{et} \quad dx = d\alpha \frac{P}{4\pi}$$

et la résultante sera :

$$F = D.K. \frac{P}{4\pi} \int_0^{\pi} \sin \alpha \, d\alpha$$

$$F = D.K. \frac{P}{2\pi}$$

De plus, cette force tourne constamment à la vitesse de rotation relative des deux engrenages, et en tournant se déplace le long de l'axe d'un quart de pas pour sauter brusquement d'un quart de pas en arrière et reprend sa rotation avec un décalage d'un demi-tour.

Il est intéressant de noter que cette force radiale qui s'applique sur le rotor est à angle droit avec la force centrifuge appliquée au rotor dans le cas où l'engrenage interne tourne dans un stator.

Pour cette raison, dans les pompes à rotor libre, où je n'ai pas recherché un équilibrage rigoureux, je tâche d'égaliser sensiblement ces deux forces de façon à avoir la moindre résistance.

Cette résultante se traduit, en effet, par une pression du rotor sur le stator.

L'importance relative de cette force tournante diminue beaucoup avec des capsulismes à plusieurs pas.

GUIDAGE

Il peut être intéressant de guider les engrenages constituant un capsulisme R. M. par des moyens qui leur permettent d'être toujours au voisinage du contact à une distance aussi petite que la précision d'usinage le permettra.

Je n'ai pas voulu terminer ce chapitre sans donner quelques schéma des dispositifs employés.

On voit fig. 42 un dispositif à une dent et deux dents à rotor libre guidé par un arbre portant un palier excentré, la rotation du rotor étant commandée par un petit pignon, roulant dans un grand pignon de diamètre double. La rotation du palier excentré est entraînée par la translation circulaire de l'arbre excentré.

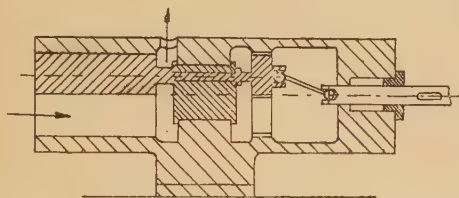


Fig. 42

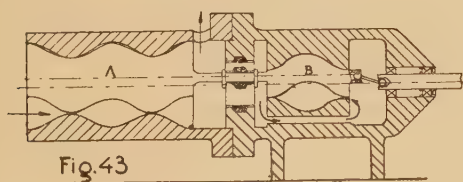


Fig. 43

La fig. 43 est tout à fait analogue, mais les pignons de guidage sont remplacés par un capsulisme R. M., de même excentricité, mais plus court et d'un diamètre qui peut d'ailleurs être différent.

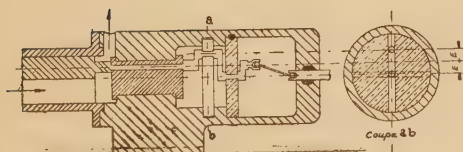


Fig. 44

La fig. 44 représente un dispositif analogue où le guidage est assuré par deux manetons calés à 180° , de même excentricité que le capsulisme à guider et coulisant dans deux rainures calés à 90° l'une de l'autre.

La fig. 45 représente un mécanisme où la rotation du rotor et la rotation de l'arbre excentré sont toutes deux commandées positive-

ment en tenant compte du fait qu'elles sont à vitesses égales et de signes contraires.

Le dispositif de la fig. 45, réalisé par 5 engrenages semblables, pour-d'ailleurs être tous droits, qui pourraient ne comporter que 3 engrenages coniques.

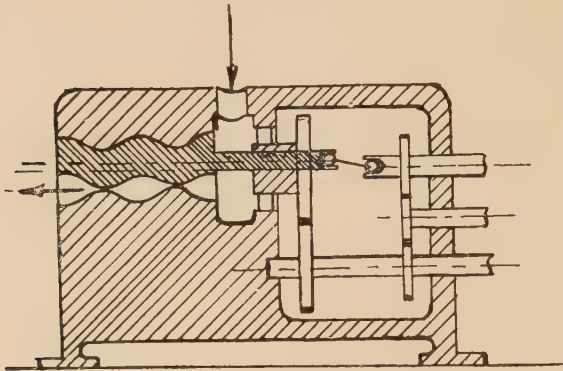


Fig. 45

TURBINES A LIQUIDES

Les capsulismes R. M. étant réversibles peuvent être employés comme turbines :

Seules, de très petites turbines à eau ont été construites à ce jour; mais il faut noter que quand le mécanisme grandit la fuite croît moins vite que le volume engendré, et le rendement croît.

Une extrapolation modérée des essais actuels permet de penser que, à 500 m³-heure de débit, le rendement atteindrait déjà 90 %, et qu'on irait ensuite notablement au delà de ce chiffre.

Mais une telle turbine ne peut travailler qu'à pleine admission; il en résulterait une grande stabilité de fonctionnement, avec comme contre-partie, un manque de souplesse.

Mais de tels appareils auraient une remarquable résistance aux eaux sableuses ou même contenant des pierres.

Il est évident que les descriptions et théories précédentes gardent tout leur intérêt, le capsulisme R. M. étant réversible.

CONSIDERATIONS PARTICULIERES
A L'UTILISATION DES CAPSULISMES R. M.
POUR COMPRIMER OU DETENDRE
LES FLUIDES COMPRESSIBLES

COMPRESSEURS

Nous supposerons toujours avoir affaire à un capsulisme à une et deux dents.

Débit dans un réservoir très grand.

J'ai schématisé (fig. 46), un tel fonctionnement supposé sans fuite.

1° Immédiatement après le départ, il y a compression adiabatique instantanée d'un volume $2V$.

Etat initial : $P_0, 2V$.

Etat final : P_1, V' .

2° Pendant le premier demi-tour, un volume $2V$ est refoulé à pression constante, de P_0 à P .

3° Immédiatement après la fin du premier demi-tour, il y a compression adiabatique instantanée d'un volume $2V$.

Etat initial : $P_0, 2V$.

Etat final : P, V' .

4° Pendant le deuxième demi-tour, un volume $2V$ est refoulé à pression constante de P_0 à P .

Pendant un tour du piston :

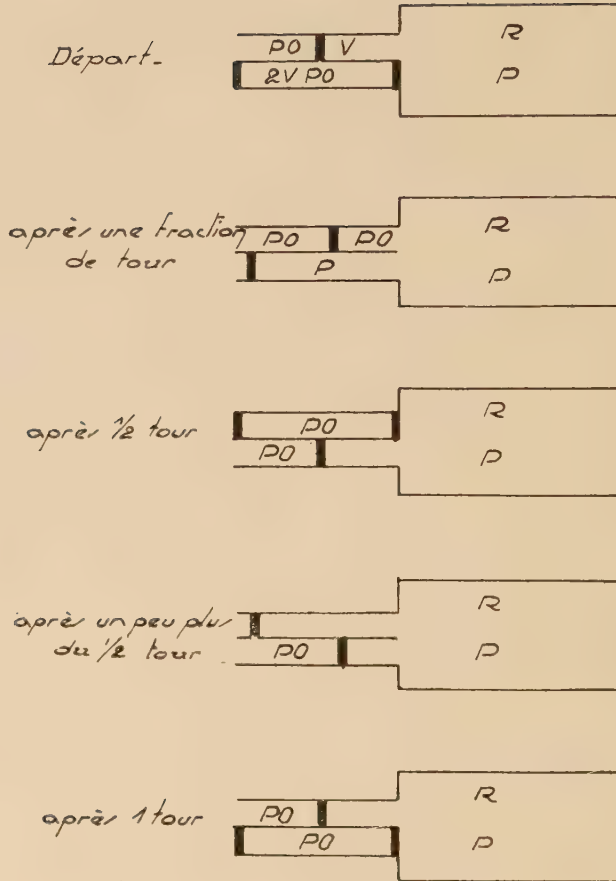


Fig.46

Dans les deuxième et quatrième opérations, l'agent extérieur, c'est-à-dire le moteur, doit fournir un travail T_1 qui est donc approximativement :

$$T_1 = (P - P_0) 2V + (P - P_0) 2V$$

$$T = (P - P_0) \times 4 V$$

Dans les première et troisième opérations, c'est le réservoir qui reconstitue une partie de l'énergie qui lui a été fournie dans les deuxième et quatrième opérations.

Diagramme

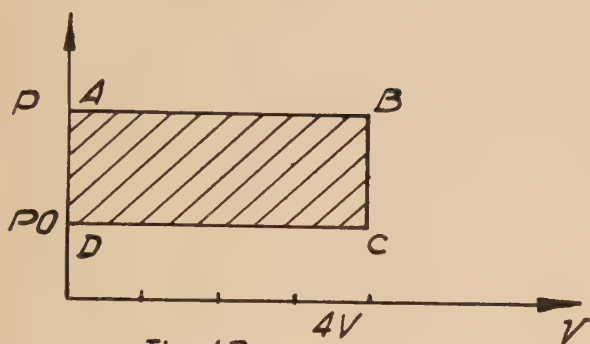


Fig. 47

Dans le capsulisme R. M. ainsi décrit, nous obtenons le diagramme de la fig. 47. A chaque tour du piston, on refoule un volume $4V$ d'une pression P_0 à la pression P . L'aire A, B, C, D représente le travail absorbé par le compresseur.

Remarque :

Il n'y a pas d'espace nuisible.

Le diagramme d'un compresseur ordinaire aurait l'allure du diagramme représenté sur la fig. 48.

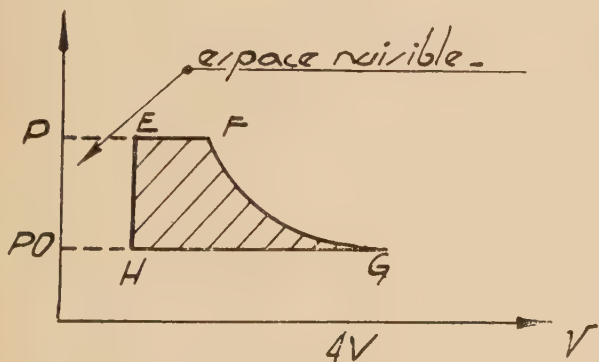


Fig. 48

Dans le cas considéré, le travail absorbé par le compresseur ordinaire est plus petit que celui qui est absorbé par le capsulisme R. M., mais par contre à volume engendré égal, le capsulisme R. M. a un plus grand débit que le compresseur ordinaire.

Une étude analogue mais plus longue pourrait s'appliquer au débit dans un petit réservoir. Cette étude montre un rendement amélioré.

L'expérience a montré qu'en lubrifiant le compresseur, la fuite ne dépasse pas 10 à 20 % du volume engendré jusqu'à une pression dépendant du liquide employé pour laquelle le liquide ne constitue plus une obturation.

AMELIORATION DU DIAGRAMME

Seuls les très petits compresseurs sont réalisés comme il vient d'être dit. Dès que l'on veut grandir, il faut améliorer le diagramme de fonctionnement.

Plusieurs procédés peuvent être employés :

a) On peut avoir des engrenages dont le pas varie longitudinalement (voir page 11).

b) On peut, le long de P, faire varier E.

Dans ce cas, on obtient des engrenages coniques à axes concourants.

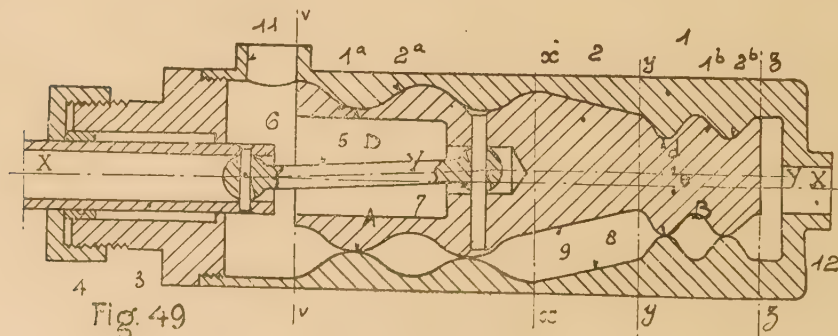
c) On peut aussi, le long de P, faire varier D.

Dans ce cas, on obtient des engrenages coniques à axes parallèles.

d) On peut employer plusieurs de ces moyens simultanément.

e) On peut mettre bout à bout des engrenages de pas différents.

f) On peut mettre bout à bout des engrenages de diamètre et de pas différents (fig. 49).



g) On peut employer des capsulismes de volumes engendrés différents, simplement réunis en série.



Fig. 50

h) On peut employer un véritable distributeur.

Il serait trop long et peu instructif d'étudier chacun de ces dispositifs.

Notons cependant ce qui se passe dans le cas de la fig. 49.

Le compresseur peut être schématisé comme ci-contre (fig. 50), et l'on voit que le dispositif fonctionne d'abord comme un compresseur puis, ensuite, comme le transporteur de la fig. 47, et l'on a finalement le diagramme de la fig. 51.

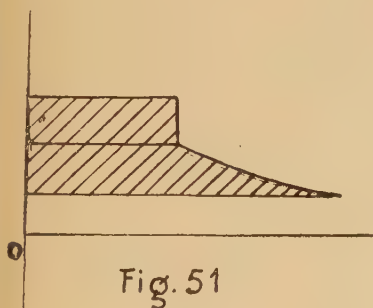


Fig. 51

REMARQUE :

La lubrification est souvent obtenue suivant le schéma de la fig. 52. Le réservoir qui surmonte le compresseur contient le lubrifiant et le gaz comprimé. Le lubrifiant étant sous pression, pénètre de lui-même dans le compresseur par un gicleur calibré de façon à per-

mettre un débit qui soit une faible fraction du volume engendré par le capsulisme : $1/10$ à $1/100$.

Et il est intéressant de noter que, dans ce cas, le lubrifiant peut être de l'eau, surtout si l'on emploie un stator en caoutchouc. Dans ce cas, l'évaporation de l'eau au passage dans le capsulisme maintient l'air comprimé froid (compression isothermique), air et vapeur d'eau.

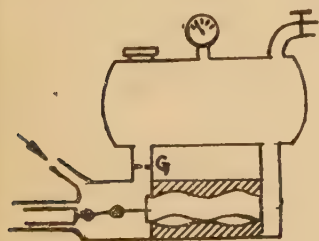


Fig. 52

DETENTE

Il est clair que les capsulismes R. M. étant réversibles peuvent produire ou utiliser des détente.

C'est ainsi qu'ils peuvent faire des turbines à vapeur ou à air comprimé et les considérations développées au sujet des compresseurs sont applicables notamment en ce qui concerne l'obtention d'un bon diagramme.

Le schéma de la figure 53 représente une anticipation où l'on voit un capsulisme R. M. réduit à deux rotors tournant chacun autour de leur axe et séparés par une chambre C.

Si la rotation est telle que A est compresseur et B détenteur, en ayant en C un réchauffage ou une combustion, l'ensemble constitue une turbine à air.

Si la rotation est telle que B est compresseur et A détenteur, en ayant en C un refroidisseur, l'ensemble constitue une machine frigorifique à air.

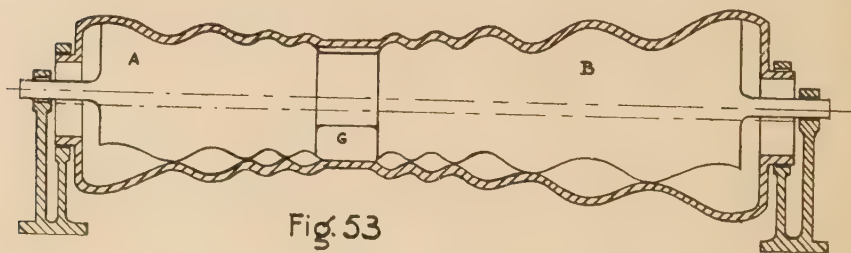


Fig. 53

Ce schéma fut dès l'origine le but de mes recherches.

USINAGE

La première objection qui me fut faite quand je présentai la première idée de mes capsulismes, est qu'il étaient pratiquement inusables.

De fait, c'est le problème d'usinage qui me causa le plus de difficultés au début, c'est pourquoi il me semble intéressant de décrire les procédés que j'ai dû créer et les problèmes géométriques sur lesquels ils s'appuient.

Je me bornerai à indiquer les solutions se rapportant au capsulisme à une et deux dents, l'engrenage à une dent ayant une section circulaire.

ENGRENAGE A UNE DENT

Comme pour tous les engrenages, on peut employer une fraise de forme.

Parmi les diverses solutions possibles, la plus simple est d'employer une fraise dont l'axe est parallèle à l'axe du rotor :

On trace sur la figure 54 quelques sections du piston, chacune de ces sections étant déterminées par l'angle θ .

θ varie de 0 à 360.

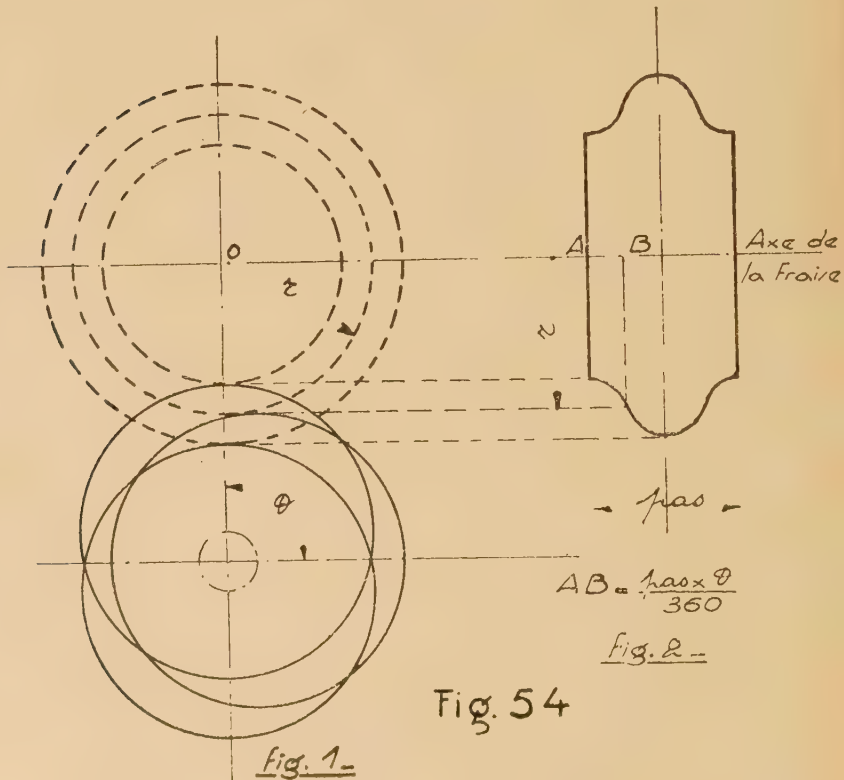


Fig. 54

D'un point *o* convenablement choisi, on trace des circonférences tangentes aux différentes sections du piston.

Les rayons de ces circonférences sont les rayons de la fraise dans les sections correspondantes :

$$AB = \frac{\text{pas} \times \theta}{360}$$

Mais il est plus intéressant de se rappeler que la section de l'engrenage à une dent étant toujours un cercle il pourra être tourné sur un tour pourvu que la section à usiner soit présentée à l'outil au moment voulu.

Il suffit que le tour comporte des moyens pour faire tourner la pièce à usiner autour de son axe tandis que cet axe est lui-même animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe excentré par rapport à l'axe de la pièce à usiner (excentricité égale à l'excentricité désirée), les nombres de tours de la pièce à usiner autour de son axe et de ce dernier autour dudit axe excentré étant dans le

$$\text{rapport } \frac{n \pm 1}{n}$$

n mesurant le nombre de tours correspondant à une avance de l'outil égale au pas hélicoïdal de l'élément à usiner.

La fig. 55 représente un tour agencé de manière à réaliser ces conditions.

La pièce à usiner 2 est montée sur un mandrin 6 d'axe *xx* confondu avec l'axe de la pièce à usiner et excentré de la valeur *C* par rapport à l'axe *yy* du tour autour duquel le mandrin peut tourner.

Le mandrin est entraîné en rotation autour de l'axe *yy* par un moteur 8, par l'intermédiaire d'une courroie 8 et d'un arbre 7 d'axe *yy*. Une roue d'engrenage 10, solidaire en rotation de l'arbre 7, entraîne la vis mère 11 de commande du mouvement d'avance de l'outil 4, par l'intermédiaire de roues dentées 12, 13, 14. Une deuxième roue dentée 16, également solidaire en rotation de l'arbre 7 constitue la première roue d'un train d'engrenages 16, 17, 18, 19, 20, 21.

La dernière roue 21 de ce train est montée folle sur l'arbre 7 et elle entraîne en rotation la pièce à tourner 2 autour du mandrin 6.

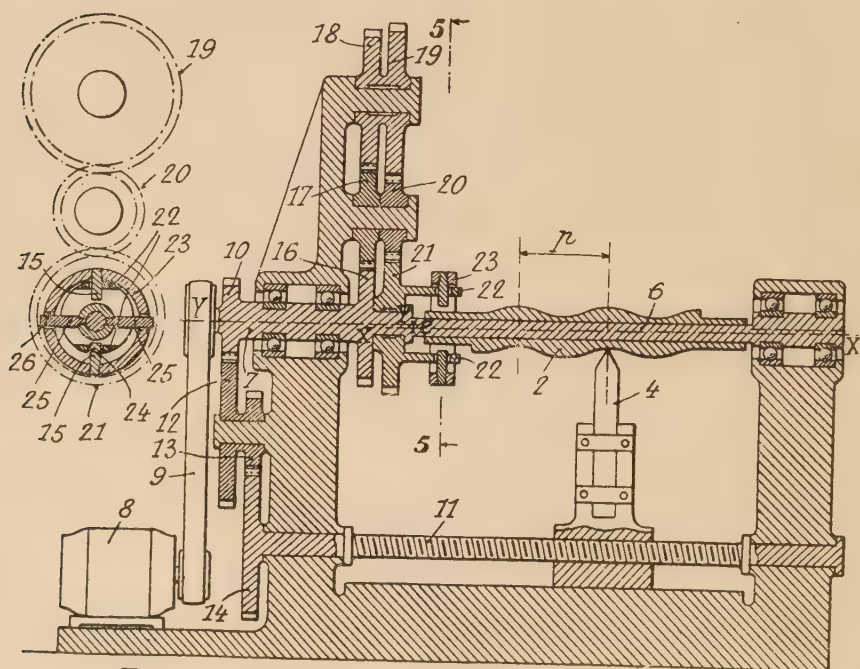


Fig. 55

Comme ce mandrin tourne excentriquement et que la liaison entre la roue 21 et la pièce 2 doit être homocinétique, elle est réalisée au moyen d'un joint de Oldham.

La figure 56 représente une variante de réalisation du tour, dans laquelle le mandrin excentré est remplacé par deux pointes excentrées 26 et 27, situées dans le prolongement l'une de l'autre et tournant en synchronisme.

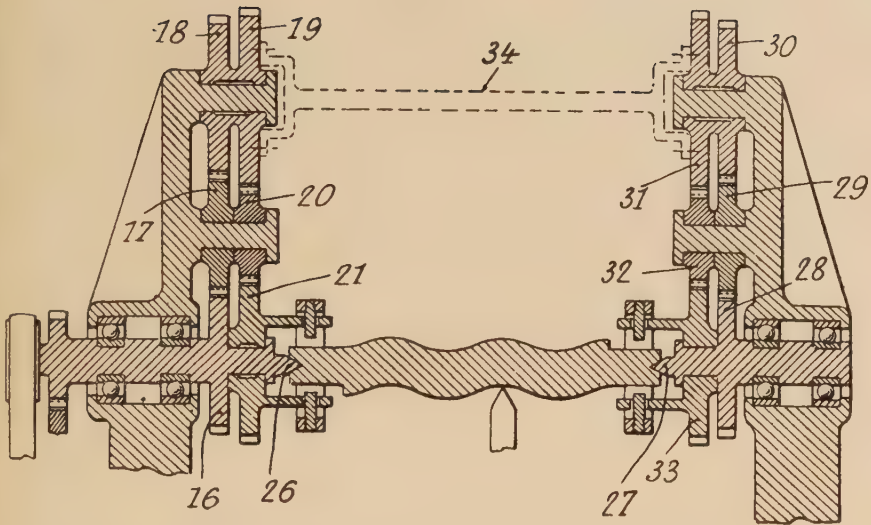


Fig. 56

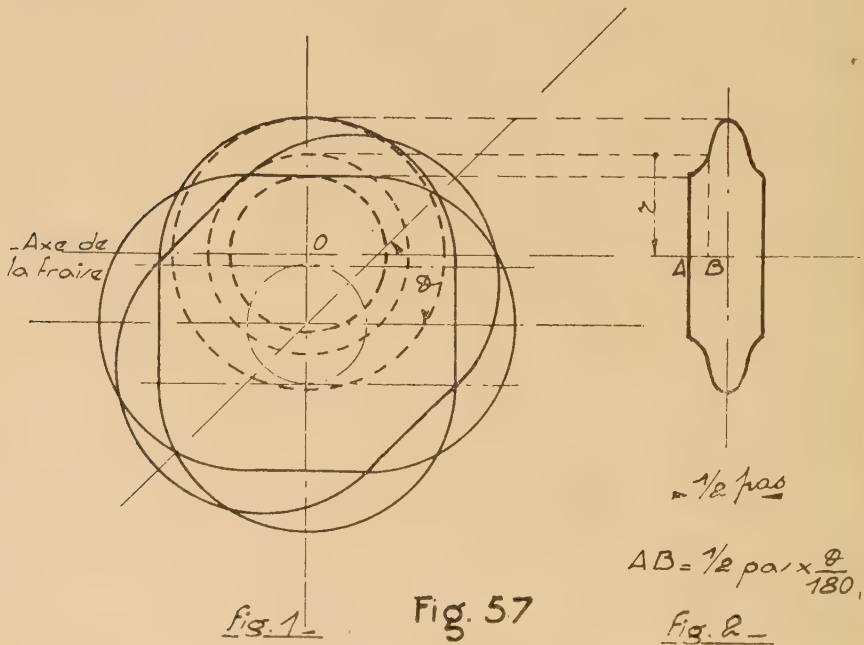
Le synchronisme est obtenu par un train d'engrenages 28, 29, 30, 31, 32, 33, exactement symétrique au premier 16 à 21 et le mouvement est transmis à la roue 33 de ce train par la pièce à travailler elle-même, ou par l'arbre en pointillé.



ENGRENAGE A DEUX DENTS

On peut procéder comme il a été dit plus haut pour celui à une dent avec une fraise à axe parallèle à celui de la pièce à usiner.

1° On trace quelques sections de la pièce définies par l'angle θ (fig. 57).



2° D'un point O on trace des circonférences tangentes aux sections de la pièce.

3° Les rayons de ces circonférences sont les rayons de la fraise dans les sections correspondantes :

$$(AB = \frac{1}{2} \text{ pas} \times \frac{\theta}{180})$$

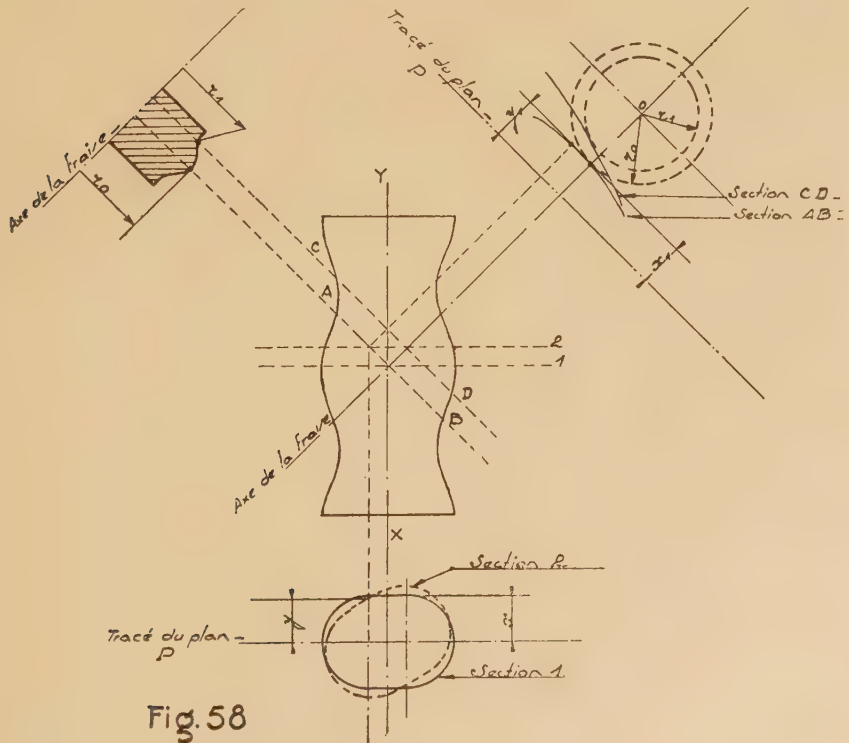
Le plus souvent, les statots sont taillés en remarquant que la section du deux dents peut être engendrée en déplaçant un cercle sur une droite.

Mais pour les statots moulés, notamment ceux qui sont en caoutchouc, il y a lieu de faire un noyau de forme.

La construction de ces noyaux est faite sur une fraiseuse et les fraises sont tracées par lun des procédés suivants :

— *Usinage d'un noyau de stator à deux dents au moyen d'une fraise de forme dont l'axe est placé obliquement par rapport à l'axe du noyau.*

Détermination du profil de la fraise (fig. 58) :



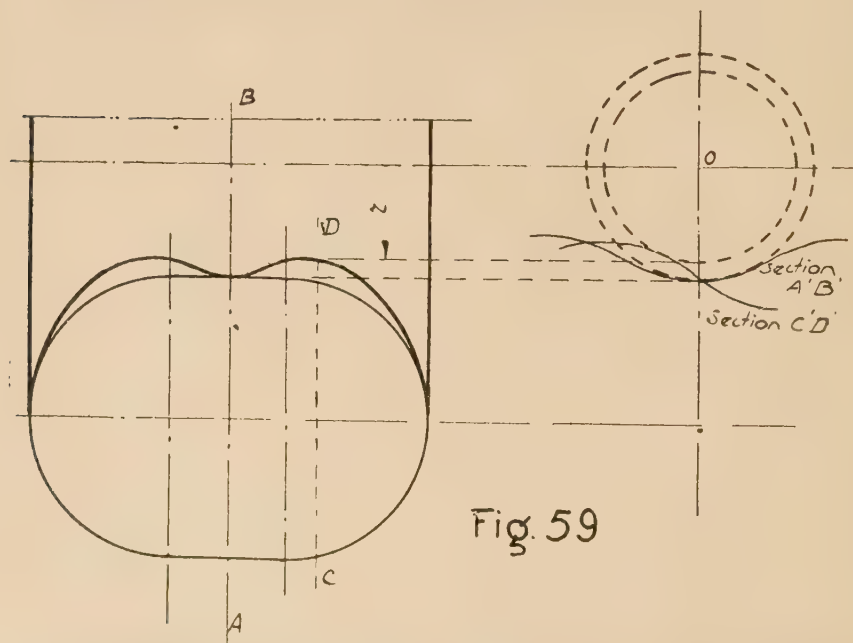
Je trace les sections ab , cd , etc., du noyau par des plans perpendiculaires à l'axe de la fraise : d'un point O convenablement choisi, je trace les circonférences de rayons r_o , r_i , etc., tangentes aux sections ab , cd , etc.

Ces rayons r_0 , r_1 sont les rayons de la fraise dans les plans correspondants A B, C D.

Le tracé des sections ab s'obtient en portant sur les lignes de rappel des longueurs x, y , respectivement égales à x et à y .

— Usinage d'un noyau au moyen d'une fraise de forme dont l'axe est perpendiculaire à l'axe du noyau.

Détermination du profil de la fraise (fig. 59) :



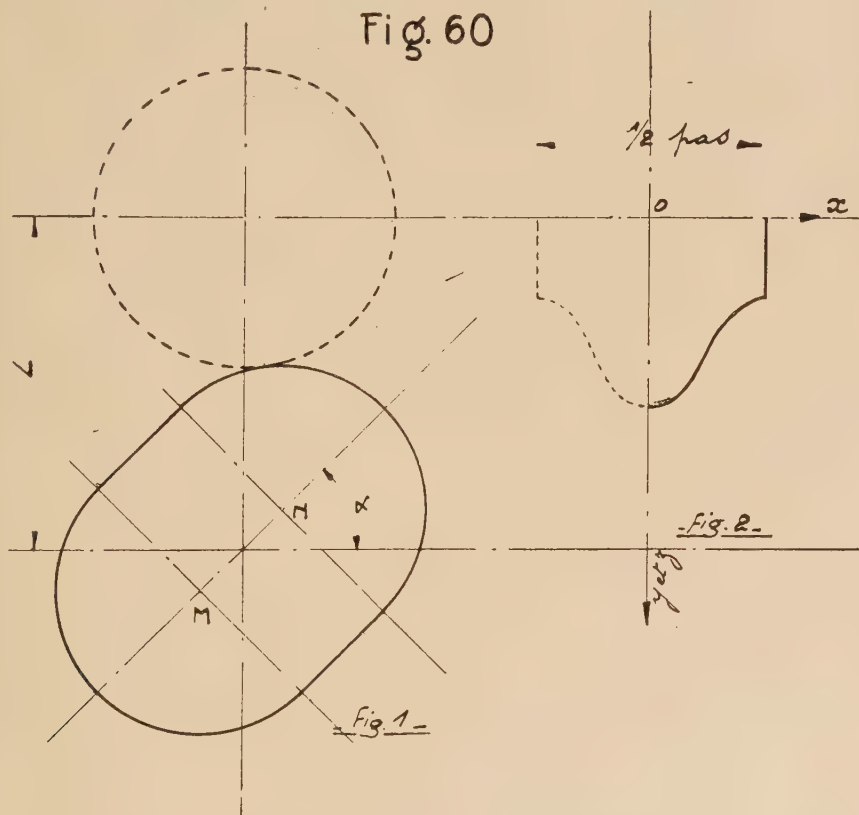
Connaissant la section droite du noyau et le pas, on peut déterminer les sections $A'B'$ et $C'D'$ du noyau.

Si d'un point O convenablement choisi, je trace une circonférence tangente à la courbe C' D', le rayon de cette circonférence est

le rayon r de la fraise de la section C D. On peut ainsi déterminer le profil de la fraise en faisant plusieurs sections telles que A B et C D.

— *Usinage d'un noyau au moyen d'une fraise de forme dont l'axe est parallèle à l'axe du noyau* (fig. 60).

1° Détermination graphique du profil de la fraise :



On trace sur la fig. 1 des sections du noyau, chacune de ces sections étant déterminées par l'angle α , α varie de 0 à 90° quand x varie d'un quart de pas.

D'un point O convenablement choisi, on trace des circonférences tangentes aux différentes sections du noyau.

Les rayons de ces circonférences sont les rayons de la fraise dans les sections correspondantes :

$$OB = X = \frac{p}{4} \times \frac{\alpha}{90} = \text{pas} \times \frac{\alpha}{360}$$

La longueur de la fraise est de $1/2$ pas.

Son profil est symétrique par rapport à l'axe des y .

2° Détermination du profil de la fraise par le calcul :

Ce dernier procédé s'est montré le meilleur et ceci d'autant plus que, dans ce cas, la fraise peut être calculée :

Des constructions géométriques faciles montrent qu'il y a deux équations à résoudre suivant que l'on usine la partie droite ou la circonférence.

$$a) \quad y^2 + 2ry + 4EL \sin \alpha - L^2 - 4E^2 + r^2 = 0$$

pour $\alpha_1 < \alpha < 90^\circ$

$$b) \quad z = L \cos \alpha - r$$

pour $0 < \alpha < \alpha_1$

α_1 est déterminé en remplaçant y par z dans l'équation a).

r est le rayon des circonférences du noyau.

L la distance des axes de la fraise et du noyau.

E est égal à $\frac{MN}{4}$

REALISATIONS

Le capsulisme R. M., se composant de deux pièces, peut être construit dans les matériaux les plus divers et déplacer, pomper ou comprimer tous les gaz, liquides ou poudres qui peuvent passer dans un tuyau.

A ce jour, le plus grand développement industriel a trait aux pompes qui se distinguent par :

- Bon rendement avec une grande marge pour la vitesse et la pression d'utilisation.
- Fonctionnement possible à l'air d'où auto-amorçage et vide élevé.
- Avec l'emploi du caoutchouc grande résistance à l'abrasion.

Les compresseurs sont, à ce jour, le plus souvent lubrifiés à l'eau et employés toutes les fois que l'on souhaite de l'air comprimé froid et sans huile.

Les capsulismes R. M. sont actuellement construits sous mes directives techniques dans presque tous les grands pays industriels et donnent lieu chaque année à des réalisations plus importantes.

BIBLIOGRAPHIE

F. REULEAUX. — *Cinématique*, traduit de l'allemand par A. Debize.
(Librairie F. Savy, 1877.)

L. POILLON. — *Traité des pompes et machines à élever les eaux*.
(E. Bernard et C^e, Paris, 1885.)

Henry T. BROWN. — *Mouvements mécaniques*, traduit de l'anglais
par Henri Stevart. (Gauthier-Villiers, 1890.)

A. WITZ. — *La machine thermique*.
La machine à vapeur. (1891.)

R. MASSE. — *Les pompes*. (Dunod, 1903.)

BERTHIER. — *Les nouvelles machines thermiques*. (Desforges, 1908.)

LOUIS BERGERON. — *Machines hydrauliques*. (Dunod, 1928.)

René CHAMPLY. — *Pompes et élévateurs de liquides*. (Béranger,
1931.)

PUMPING MACHINERY. — *Historical Notes* (1932.)
Descriptive catalogue (1937.)

TECHNIQUE MODERNE. (1^{er} mai 1934.)

TABLE DES MATIERES

UN NOUVEAU CAPSULISME	3
DESCRIPTION	7
<i>Théorique</i>	7
Première condition	8
Deuxième condition	10
<i>Pompe à plus de deux éléments</i>	12
FONCTIONNEMENT	17
<i>Débit théorique</i>	17
<i>Débit pratique, ligne de fuite</i>	23
<i>Vitesse de rotation</i>	26
<i>Considération sur le choix de E. D. P.</i>	28
<i>Description d'un capsulisme R. M.</i>	30
<i>Pompes à plusieurs étages</i>	32
EQUILIBRAGE	33
<i>Forces centrifuges</i>	33
<i>Pression des fluides</i>	39
Efforts axiaux	39
Efforts radiaux	41

<i>Guidage</i>	43
TURBINES A LIQUIDES	45
CONSIDERATIONS PARTICULIERES A L'UTILISA- TION DES CAPSULISMES R. M. POUR COMPRIMER OU DETENDRE DES FLUIDES COMPRESSIBLES .	47
<i>Compresseurs</i>	47
Amélioration du diagramme	50
<i>Détente</i>	52
USINAGE	53
<i>Engrenage à une dent</i>	54
<i>Engrenage à deux dents</i>	58
REALISATIONS	63
BIBLIOGRAPHIE	65
TABLE	67



